

ИССЛЕДОВАНИЕ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АКТИВНЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ В СОСТАВЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ КЛЕТЕЙ ПРОКАТНОГО СТАНА

В работе предложена система управления активным выпрямителем (АВ) преобразователя частоты (ПЧ) с изменяемой частотой коммутации силовых ключей АВ, учитывающая изменение режимов работы электропривода клетки прокатного стана. В системе управления АВ применена широтно-импульсная модуляция (ШИМ) с удалением выделенных гармоник. При снижении нагрузки или работе электропривода на холостом ходу система управления АВ выбирает таблицу углов переключения силовых ключей, соответствующую текущему режиму работы. Применение таблиц с увеличенной частотой переключения позволяет исключить из спектра потребляемого тока большее число гармоник, что положительно сказывается на качестве напряжения питающей сети. Предложен способ переключения таблиц на основе сравнения действующего значения тока АВ с заранее определёнными граничными значениями, полученными с применением разработанной методики анализа теплового баланса тиристоров. Имитационное моделирование производилось в программном пакете Matlab-Simulink на комплексной математической модели внутренней распределительной сети металлургического предприятия, имеющего электропривод с ПЧ-АВ. Особенно-стью данной питающей сети является наличие сложных резонансных явлений. Сравнительный анализ данных, полученных при имитационном моделировании для цикла работы прокатного стана с электроприводом на базе ПЧ-АВ, показал положительный технический эффект на качество напряжения питающей сети 10 кВ при работе электропривода стана на холостом ходу или при сниженной нагрузке.

Ключевые слова: активный выпрямитель, преобразователь частоты, широтно-импульсная модуляция, показатели качества электроэнергии, электромагнитная совместимость, система управления, режим работы электропривода.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема электромагнитной совместимости мощных электроприводов (ЭП) на базе преобразователей частоты с активными выпрямителями (ПЧ с АВ) стала актуальной в связи с их широким внедрением в металлургической промышленности [1-5]. Эти преобразователи стали использоваться в главных ЭП станов холодной и горячей прокатки. В связи с растущими запросами рынка к размерам и качеству проката, а также производительности станов главные ЭП клетей выполняются на значительные мощности, достигающие более 12 МВт [2, 4, 5]. Учитывая то, что для обеспечения высокой производительности прокатные станы выполняются многоклетевыми, суммарная мощность ЭП может составлять более 50 МВт [5].

Работа столь мощных потребителей несинусоидального тока часто оказывает существенное негативное влияние на питающую сеть, что приводит к ненормальной работе других потребителей электрической энергии в распределительной сети предприятия или возникновению аварийных ситуаций [5-7]. Для снижения негативного влияния ПЧ-АВ на питающую сеть применяют различные методы: 1) создание «грязной» секции в системе электроснабжения, питающей ПЧ; 2) установка устройств компенсации реактивной мощности; 3) повышение мощности питающих трансформаторов. Следует отметить, что подобные решения подразумевают значительные капитальные затраты, поэтому широкое распространение получили специальные алгоритмы широтном-импульсной модуляции (ШИМ) силовых ключей АВ, а именно ШИМ с удалением выделенных гармоник (ШИМ с УВГ) или ШИМ с подавлением выделенных гармоник (ШИМ с ПВГ) [8-11]. Применение данных алгоритмов ШИМ позво-

ляет снизить величины некоторых гармоник в спектре потребляемого ПЧ тока или полностью исключить их. Однако количество гармоник, подлежащих исключению или подавлению, ограничено возможностью отыскания математического решения сложных систем уравнений. Для ШИМ с УВГ система уравнений в общем случае имеет следующий вид [8, 9, 11]:

$$\begin{cases} \cos(a_1) - \cos(a_2) + \cos(a_3) + \dots + \cos(a_n) = \mu; \\ \cos(m_1 a_1) - \cos(m_1 a_2) + \cos(m_1 a_3) + \dots \\ \dots + \cos(m_1 a_n) = 0; \\ \dots \\ \cos(m_{n-1} a_1) - \cos(m_{n-1} a_2) + \cos(m_{n-1} a_3) + \dots \\ \dots + \cos(m_{n-1} a_n) = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где a_i – угол переключения силового ключа АВ; m_i – номер гармоники, подлежащей исключению; n – число углов переключения за четверть периода.

Как правило, число гармоник, подлежащих исключению, составляет $n-1$. Значит, для исключения большего числа гармоник требуется увеличить число переключений за четверть периода, т.е. частоту коммутации силовых ключей.

Современные преобразователи строятся на базе полностью управляемых полупроводниковых ключей: IGBT-транзисторах или IGCT-тиристорах [1, 12-14]. При значительных мощностях ПЧ применяют жидкостное охлаждение таких ключей, т.к. выделяемая тепловая мощность может достигать нескольких сотен киловатт. Увеличение частоты коммутации силовых ключей приводит к увеличению потерь энергии в них. Производители ПЧ при пуско-наладке производят тепловой расчёт возможности работы АВ на заданной частоте коммутации при текущей системе охлаждения.

В случае если возникает необходимость улучшить качество напряжения во внутренней распределительной сети предприятия при работе мощных ПЧ с АВ, тепловой баланс полупроводниковых ключей вносит ограничения в возможность значительного увеличения частоты коммутации, а значит, и числа устраняемых гармоник.

В предыдущей работе [5] была рассмотрена проблема ЭМС мощных ПЧ-АВ прокатного стана с внутризаводской питающей сетью, имеющей сложный резонанс в частотной характеристике. В результате чего гармоники, генерируемые АВ ПЧ, многократно усиливались на шинах главной понизительной подстанции (ГПП) предприятия, что оказывало существенное влияние на работу остальных потребителей. Для решения данной проблемы были рассчитаны новые таблицы углов переключения силовых ключей с учётом исключения гармоник, попадающих в зону основного резонанса на шинах секций ГПП. Это позволило практически в 2 раза улучшить качество напряжения в точке общего подключения потребителей.

В работе [15] для того же объекта исследований был произведен анализ качества напряжения на секциях распределительной подстанции (РП), от которой получают питание ЭП прокатного стана, и секциях ГПП на протяжении всего цикла прокатки. Имитационное моделирование показало, что величины суммарного коэффициента гармонических составляющих (СКГС) при работе стана на холостом ходу для секций РП превышают величины при прокатке листа, для секций ГПП – остаются примерно на том же уровне.

Учитывая то, что при работе ПЧ-АВ на холостом ходу ток, протекающий через силовые ключи, относительно мал, на основании разработанной ранее системы управления АВ с выбираемыми таблицами углов переключения [16] была предложена идея реализовать систему управления АВ с изменяемой частотой коммутации силовых ключей в зависимости от режима работы ЭП.

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ АВ С ИЗМЕНЯЕМОЙ ЧАСТОТОЙ КОММУТАЦИИ СИЛОВЫХ КЛЮЧЕЙ

На рис. 1 представлена обобщённая структурная схема предлагаемой усовершенствованной системы управления АВ. В правой части рисунка изображена типовая силовая схема ЭП с ПЧ-СД. Для реализации двенадцатипульсовой схемы выпрямления применены два понизительных трансформатора Т1 и Т2 с различными группами соединения вторичных обмоток, обеспечивающими сдвиг напряжения на 30°. Питание трансформаторов осуществляется от питающей сети 10 кВ через вакуумный выключатель Q1. Датчик тока ДТ необходим для измерения величин фазных токов АВ i_{abc} . Реакторы Р1 и Р2 служат для сглаживания токов и обеспечения работоспособности АВ. Напряжение на синхронный двигатель СД формирует автономный инвертер напряжения АИН. Трансформатор Т3, запитанный через вакуумный выключатель Q2, служит для питания тиристорного возбудителя ТВ, регулирующего ток в обмотке возбуждения ОВ синхронного двигателя.

Система регулирования реализована двухконтурной: внешний контур – регулятор напряжения РН в звене постоянного тока U_{DC} ; внутренний – регуляторы РТ токов i_d, i_q во вращающейся системе координат $dq0$. Для компенсации перекрёстных связей объекта регулирования применяется блок БКПС. Для преобразования величин в различные системы координат применены блоки $dq0/abc$ и $dq0/m\Theta$. Блок фильтра нижних частот ФНЧ используется для подавления высших гармонических составляющих фазных токов АВ. Для перехода во вращающуюся систему координат блок фазовой автоподстройки частоты ФАПЧ формирует опорный сигнал ωt , синхронизированный с сетевым напряжением U_C . Для измерения величин напряжений U_{abc} и U_{DC} применены датчики напряжения ДН.

В данной системе управления за основу был взят метод ШИМ с удалением выделенных гармоник, реализованный в блоке ШИМ.

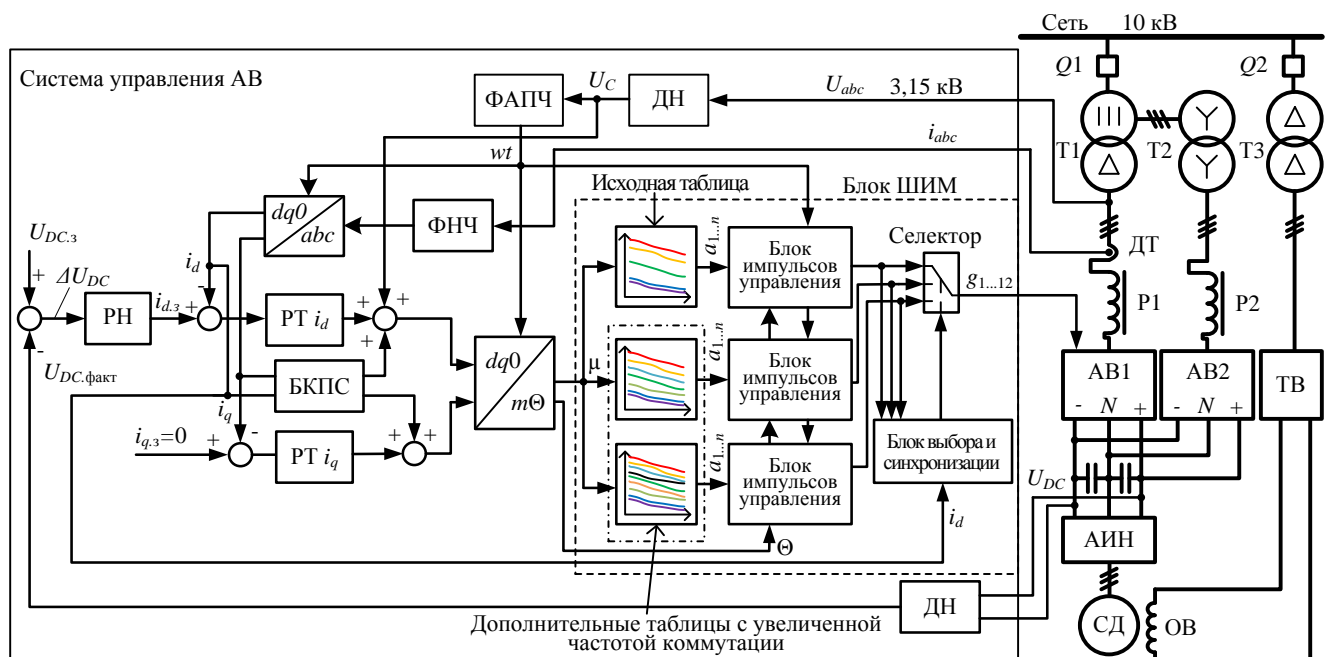


Рис. 1. Структурная схема разработанной системы управления АВ с изменяемой частотой коммутации силовых ключей, учитывающая режим работы электропривода

Однако исходный алгоритм был расширен двумя дополнительными таблицами с углами переключения силовых ключей с повышенной частотой коммутации. На каждую таблицу поступает величина вектора задания – коэффициент модуляции μ . На выходе таблицы формируются величины углов переключения $a_{1...n}$, соответствующие данному коэффициенту модуляции. Они поступают в блок импульсов управления, где формируются логические сигналы управления IGCT-тиристорами. Блок селектора позволяет отправлять в драйвера тиристоров логические сигналы управления, сформированные при использовании необходимой таблицы. Логический сигнал выбора необходимой таблицы формирует «Блок выбора и синхронизации» в зависимости от величины тока i_d , потребляемого АВ, и текущего и нового состояния ключей для минимизации числа переключений.

На рис. 2 представлена блок-схема блока выбора и синхронизации предлагаемой СУ АВ в обобщённом виде. На вход блока подаются логические сигналы управления тиристорами АВ с каждой таблицы $g_{1,1...12}$, $g_{2,1...12}$, ..., $g_{m,1...12}$; действующая величина тока АВ i_d , а также задаются граничные значения для каждой таблицы – i_2, i_3, \dots, i_m . Производя сравнение величины тока АВ с граничными значениями токов для каждой таблицы, блок выбора таблицы определяет номер необходимой таблицы n'_t . Номер следующей таблицы передаётся в блок сравнения и в блок памяти. Блок памяти хранит номер текущей таблицы n_t , передаёт его в блок сравнения и на выход блока выбора и синхронизации. Блок сравнения производит анализ текущего состояния тиристоров и их возможного состояния при переходе на новую таблицу. В момент времени, когда потребуется минимум переключений силовых ключей, блок сравнения формирует логический сигнал перехода на новую таблицу Sw . Этот сигнал поступает в блок памяти, который по его переднему фронту производит запоминание величины n'_t как n_t . При равенстве величин n'_t и n_t блок сравнения не производит формирования сигнала Sw .

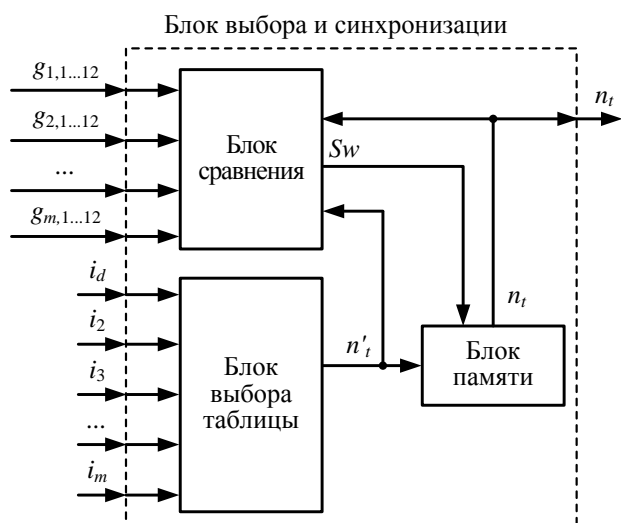


Рис. 2. Блок-схема блока выбора таблицы и синхронизации

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАНИЧНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ВЕЛИЧИН ТОКОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЧАСТОТЫ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ СИЛОВЫХ КЛЮЧЕЙ АВ

Важным этапом данной работы являлось корректное определение значений величин токов, при которых должны были сменяться таблицы углов переключения. Увеличение частоты коммутации силовых ключей приводит к их усиленному нагреву при равных величинах тока. Поэтому основным критерием является сохранение теплового баланса выделяемой на силовых ключах энергии и отводимой системой охлаждения для обеспечения устойчивой работы преобразователя.

Для выполнения расчётов были использованы спецификации [17] IGTC-тиристора 5SHY 55L4500 на 4,5 кВ и максимальной отключающей способностью 5 кА, производимого фирмами ABB Switzerland Ltd Semiconductors и Hitachi Energy Ltd. На рис. 3 приведены графики максимально допустимого тока данного тиристора в зависимости от частоты коммутации: красная кривая – при температуре окружающей среды $T_a = 50^\circ\text{C}$ и температуре корпуса тиристора $T_c < 80^\circ\text{C}$; черная кривая – при $T_a = 40^\circ\text{C}$ и $T_c < 80^\circ\text{C}$; голубой кривой показано ограничение по мощности источника питания драйвера тиристора $P_{GINMax} = 130\text{ Вт}$.

В качестве объекта, параметры которого учитывались при имитационном моделировании, так же как и в предыдущих работах [5, 15], был выбран действующий четырёхклетевый стан холодной прокатки 1750 одного отечественного металлургического предприятия. Электроприводы первой клетки и моталки данного стана реализованы по 6-пульсной схеме и имеют по одному АВ. Изначально АВ ЭП клетки I имел частоту коммутации 150 Гц при номинальном токе в 2190 А (левая верхняя красная точка на рис. 3). Активный выпрямитель моталки рассчитан на работу с током в 834 А при частоте коммутации силовых ключей в 450 Гц (правая красная точка на рис. 3). Учитывая то, что оба данных преобразователя имеют идентичные системы охлаждения через эти две точки была проведена кривая 1, повторяющая характер графиков спецификации тиристора. Учитывая кривую 1, были определены граничные значения токов для каждой частоты коммутации и построены кривые I и III для АВ клетки I и моталки соответственно.

Аналогично была получена кривая II для АВ ЭП клеток 2, 3 и 4, которые реализованы по 12-пульсной схеме и имеют в своём составе по два АВ на ток в 960 А. Исходная частота коммутации тиристоров составляла 350 Гц. Повторяя характер кривых из спецификации, была построена кривая 2 максимально-допустимого тока.

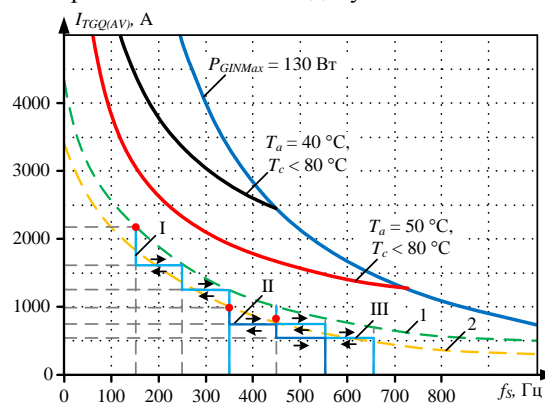


Рис. 3. Графики зависимости максимально допустимого тока IGCT-тиристора 5SHY 55L4500 от частоты коммутации

Стоит отметить, что предложенный способ определения граничных значений токов в зависимости от частоты коммутации имеет приближенный характер. В ряде случаев при внедрении данной системы управления и для достижения её максимальной эффективности могут потребоваться дополнительные расчёты и практические тесты. Однако в некоторых случаях дополнительные расчёты могут быть затруднены из-за отсутствия в открытом доступе специфических параметров преобразователей и их компонентов. Также в рамках данной работы для упрощения имитационного моделирования для АВ были рассчитаны только по две дополнительные таблицы с увеличенной частотой коммутации силовых ключей. При необходимости их число может быть больше.

АНАЛИЗ КАЧЕСТВА НАПРЯЖЕНИЯ
В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ ПРЕДПРИЯТИЯ
ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПРЕДЛАГАЕМОЙ СУ АВ

Имитационное моделирование производилось в программном пакете Matlab-Simulink с использованием ранее разработанной комплексной математической модели распределительной сети металлургического завода с учётом параметров ЭП прокатного стана, всех основных потребителей, кабельных линий, реакторов, понизительных трансформаторов и т.д. [5]. Имитационное моделирование производилось для всего цикла прокатки стана [15].

На рис. 4 показаны графики изменения суммарного коэффициента гармонических составляющих при работе стана при использовании различных алгоритмов ШИМ. Графики для исходных алгоритмов ШИМ и оптимальных были взяты из предыдущих исследований для возможности проведения сравнительного анализа. Оптимизация заключалась в исключении из спектра потребляемого тока гармоник, попадающих в зону основного резонанса на шинах секций ГПП. Именно эти таблицы углов переключения были взяты за основу при проведении данных исследований как базовые таблицы для номинальной нагрузки преобразователей.

На рис. 4, б представлены графики изменения СКГС для секции 1 распределительной подстанции, от которой получают питание ПЧ ЭП клетки 1 и 3. Видно, что при работе стана графики СКГС при использовании в АВ ШИМ с увеличенной частотой коммутации и использовании оптимальных таблиц полностью совпадают, т.к. применяются одни и те же таблицы. При динамических режимах разгона и торможения усовершенствованная СУ показывает несколько худший эффект, однако при работе ЭП на холостом ходу заметен значительный положительный технический результат.

На рис. 4, в показаны графики СКГС для секции 2 РП. Видно, что при разгоне, торможении и работе ЭП на холостом ходу использование таблиц с увеличенной частотой коммутации значительно увеличивает величину СКГС. Однако наиболее важное значение имеет величина СКГС на шинах секций ГПП, т.к. они являются точкой общего подключения внутризаводских потребителей электроэнергии. На рис. 4, а показано изменение величины СКГС для секций ГПП. Можно заметить, что применение предлагаемой СУ позволяет снизить более чем в 2 раза величину СКГС при стоянке стана, работе на заправочной скорости, что является важным, учитывая то, что время прокатки составляет только ~ 40 % от длительности цикла работы стана.

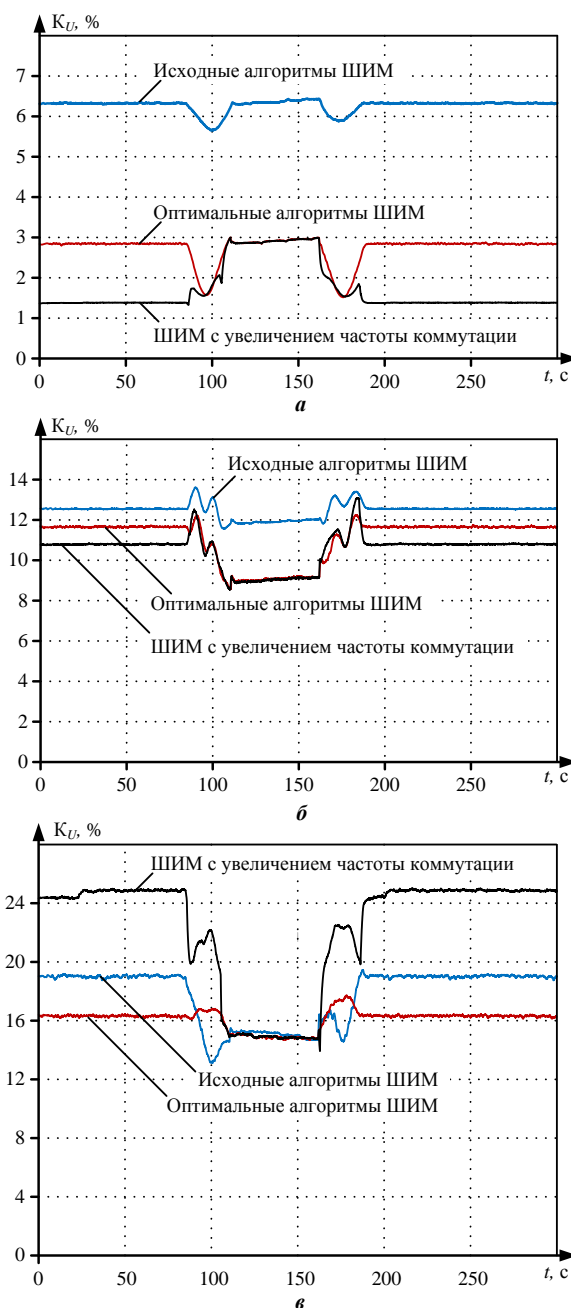


Рис. 4. Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения для а) секций ГПП, б) секции 1 РП и в) секции 2 РП при использовании исходных, оптимальных и алгоритма ШИМ с увеличением частоты коммутации

Для удобства сравнения все величины СКГС для разных точек измерения, режимов работы стана и алгоритмов ШИМ представлены в таблице. Также указано процентное изменение для каждого показателя относительно исходных настроек ШИМ. Видно, что применение усовершенствованной системы управления с изменяемой частотой коммутации силовых ключей, учитывающей режимы работы электропривода, позволяет в ряде случаев добиться более значительного улучшения показателя качества электроэнергии в различных точках системы электроснабжения по сравнению с оптимальными настройками ШИМ, но что более важно – удаётся обеспечить значительное уменьшение СКГС в точке общего подключения внутризаводских потребителей.

Результаты исследований

Точка измерения	Описание	K _U , %		
		Исх.	Опт.	Ув. ч.
Секции 1 и 2 ГПП	Заправочная скорость	6,32	2,82 -55,4%	1,39 -78,0%
	Скорость прокатки	6,37	2,91 -54,3%	2,91 -54,3%
	Минимальная величина	5,66	1,51 -73,3%	1,33 -76,5%
	Максимальная величина	6,44	3,00 -53,4%	3,00 -53,4%
Секция 1 РП	Заправочная скорость	12,54	11,63 -7,25%	10,8 -13,9%
	Скорость прокатки	11,89	9,07 -23,7%	9,07 -23,7%
	Минимальная величина	11,57	8,54 -26,2%	8,56 -26,0%
	Максимальная величина	13,61	12,21 -10,3%	13,1 -3,75%
Секция 2 РП	Заправочная скорость	19,01	16,31 -14,2%	24,8 +30,5%
	Скорость прокатки	15,19	14,89 -1,97%	14,89 -1,97%
	Минимальная величина	13,12	14,69 +12%	13,9 +5,9%
	Максимальная величина	19,44	17,73 -8,8%	24,9 +28,1%

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В данной работе была предложена система управления активным выпрямителем с изменяемой частотой коммутации силовых ключей в зависимости от режима работы электропривода. При реализации системы управления за основу был взят метод ШИМ с удалением выделенных гармоник.

2. Предложена методика определения граничных значений тока АВ в зависимости от частоты коммутации силовых ключей на основе данных из спецификации реального IGCT-тиристора. Подсчитаны величины граничных значений тока АВ в зависимости от частоты коммутации тиристоров для исследуемого объекта.

3. Рассчитаны по две дополнительные таблицы углов переключения силовых ключей с увеличенной частотой коммутации для каждого ЭП. Число дополнительных таблиц может быть большим, основное ограничение – обеспечение теплового баланса силовых ключей.

4. По результатам имитационного моделирования показан значительный положительный технический эффект по улучшению качества напряжения в точке общего подключения потребителей распределительной сети 10 кВ системы внутривозовского электроснабжения металлургического предприятия.

5. Предлагаемая СУ позволяет значительно улучшить качество напряжения во внутривозовской системе электроснабжения при работе ЭП с ПЧ-АВ на холостом ходу и наличии сложных резонансных явлений в распределительной сети.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Retrofit of a hot rolling mill plant with three-level active front end drives / G. Alonso Orcajo, Josué Rodríguez D., José M. Cano, Joaquín G. Norniebla, Pablo Ardura G., Rocío

Llera T., Diego Cifrián R. // IEEE Transactions on Industry Applications (May-June 2018). IEEE, 2018. № 54(3). Pp. 2964-2974. doi: 10.1109/TIA.2018.2808159

2. Храмов Т.Р., Корнилов Г.П. Крубцов Д.С. Оценка методов широтно-импульсной модуляции напряжения активных выпрямителей прокатных станов // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2013. № 2. С. 48-53.

3. Reactive power compensation in industrial grid via high-power adjustable speed drives with medium voltage 3L-NPC VTB converters / A.A. Radionov, V.R. Gasiyarov, A.S. Maklakov, E.A. Maklakova // International Journal of Power Electronics and Drive Systems. 2017. № 8(4). Pp. 1455-1466

4. Маклаков А.С. Имитационное моделирование главного электропривода прокатной клетки толстолистового стана 5000 // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2014. № 3. С. 16-25.

5. Providing Electromagnetic Compatibility of High-Power Frequency Converters with Active Rectifiers at Internal Power Supply System of Cherepovets Steel Mill / A.A. Nikolaev, I.G. Gilemov, M.V. Bulanov, V.I. Kosmatov // XVIII International Scientific Technical Conference Alternating Current Electric Drives (ACED). 2021. Pp. 1-8. doi: 10.1109/ACED50605.2021.9462264

6. Экспериментальные исследования электромагнитной совместимости современных электроприводов в системе электроснабжения металлургического предприятия / А.А. Николаев, Г.П. Корнилов, Т.Р. Храмов, Г. Никифоров, Ф.Ф. Муталлапова // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. № 14(4). С. 96-105. doi: 10.18503/1995-2732-2016-14-4-96-105

7. Harmonic analysis of grid-tied active front end inverters for the frequency range of 0-9 kHz in distribution networks: addressing future regulations / H. Rathnayake, K. G. Khajeh, F. Zare, R. Sharma // IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). 2019. Pp. 446-451. doi: 10.1109/ICIT.2019.8755015

8. A flexible selective harmonic mitigation technique to meet grid codes in three-level PWM converters / L.G. Franquelo, J. Nápoles, R.C.P. Guisado, J.I. León, M.A. Aguirre // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2007. № 54(6). Pp. 3022-3029. doi: 10.1109/TIE.2007.907045

9. Research on hybrid SHEPWM based on different switching patterns / T. Jing, A. Maklakov, A. Radionov, S. Baskov, A. Kulmukhametova // International Journal of Power Electronics and Drive Systems. 2019. № 10 (4). Pp. 1875-1884. doi: 10.11591/ijpeds.v10.i4.pp.1875-1884.

10. Moeini A., Zhao H., Wang S. A current reference based selective harmonic current mitigation PWM technique to improve the performance of cascaded H-bridge multilevel active rectifiers // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2018. Vol. 65. Pp. 727-737. doi: 10.1109/TIE.2016.2630664

11. Jing T., Maklakov A., Radionov A. Two selective harmonic control techniques applied in 10kV grid with three-level NPC inverter // IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI). Magnitogorsk, 2019. Pp. 75-79. doi: 10.1109/PEAMI.2019.8915413

12. Improving the performance of protection schemes in three level IGCT-based neutral point clamped converters / A.V. Rocha, G.J. França, M.E. dos Santos, H. de Paula, B.J. Cardoso Filho // IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. 2010. Pp. 2326-2332. doi: 10.1109/ECCE.2010.5617875

13. Shimada T., Taniguchi K. IGBT/MOSFET hybrid bridge with phase shift and frequency modulation control for a bidirectional series resonant converter // 19th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'17 EC-

- CE Europe). 2017. Pp. P.1-P.7. doi: 10.23919/EPE17ECSEEurope.2017.8099058
14. Ioffe I., Iunusov R., Kostylev A. The comparative analysis of processes in active front end (AFE) for cases of different power sources // IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI). 2019. Pp. 99-104. doi: 10.1109/PEAMI.2019.8915097
 15. Nikolaev A.A., Gilemov I.G., Bulanov M.V. Influence investigation of electric drive operation mode at a rolling mill FC with AR on the 10kV supply network voltage quality // International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). 2021. Pp. 535-540. doi: 10.1109/UralCon52005.2021.9559456
 16. Николаев А.А., Гилемов И.Г. Улучшение качества напряжения в электрических сетях с активными выпрямителями за счет выбора оптимальных таблиц углов переключения ШИМ // Электротехнические системы и комплексы. 2019. №4(45). С. 35-42. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-4\(45\)-35-42](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-4(45)-35-42)
 17. Официальный сайт «Hitachi Energy Ltd.». URL: <https://www.hitachienergy.com/ru/ru/offering/product-and-system/semiconductors/integrated-gate-commutated-thyristors-igct/asymmetric-and-reverse-conducting> (дата обращения 01.09.2021).

Поступила в редакцию 28 августа 2021 г.

INFORMATION IN ENGLISH

IMPROVED CONTROL SYSTEM ANALYSIS OF FREQUENCY CONVERTERS ACTIVE RECTIFIERS AS A PART OF ROLLING MILL ELECTRIC DRIVES

Alexander A. Nikolaev

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Head of Automated Electric Drive and Mechatronics Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, aa.nikolaev@magtu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5014-4852>

Ildar G. Gilemov

Postgraduate Student, Automated Electric Drive and Mechatronics Department, Nosov Magnitogorsk State University, Magnitogorsk, Russia, gilemov.ig@outlook.com, <https://orcid.org/0000-0002-2481-3378>

Oleg S. Malakhov

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Automated Electric Drive and Mechatronics Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, o.malahov@magtu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2716-004X>

The paper proposes the control system for a frequency converter active rectifier with a variable switching frequency of the AR power switches, taking into account the changes in the operating modes of the rolling mill stand electric drive. In the AR control system, Selective Harmonic Elimination PWM is used. When the load is reduced or the electric drive is idle, the AR control system selects the table of switching angles of the power switches corresponding to the current operating mode. The use of tables with an increased switching frequency makes it possible to exclude a greater number of harmonics from the consumed current spectrum, which has a positive effect on the supply voltage power quality. A method is proposed for switching tables based on comparing the value of the AR current with predetermined limit values obtained using the developed technique for analyzing the thyristor thermal balance. Simulation modeling was carried out in the Matlab-Simulink software package on a complex mathematical model of the internal distribution network of a metallurgical enterprise, which has EDs with FC-AR. A feature of this supply network is the presence of complex resonance phenomena. Comparative analysis of the data obtained during simulation modeling for the cycle of operation of the rolling mill with electric drives based on FC-AR showed a positive technical effect on the power quality of the 10 kV supply network when the mill electric drive is idle or operates at reduced load.

Keywords: active rectifier, frequency converter, pulse width modulation, power quality, electro-magnetic capability, control system, electric drive operation mode.

REFERENCES

1. Alonso Orcajo G., Josué Rodríguez D., Cano José M., Norniella Joaquín G., Pablo Ardura G., Rocío Llera T., Diego Cifrián R. Retrofit of a hot rolling mill plant with three-level active front end drives. IEEE Transactions on Industry Applications (May-June 2018). IEEE. 2018, no. 54(3), pp. 2964-2974. doi: 10.1109/TIA.2018.2808159
2. Khramshin T.R., Kornilov G.P., Krubtsov D.S. Evaluation of methods PWM voltage active rectifiers rolling mills. *Mashinostroenie: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Russian Internet Journal of Industrial Engineering], 2013, no. 2, pp. 48-52. (In Russian)
3. Radionov A.A., Gasiyarov V.R., Maklakov A.S., Maklakova E.A. Reactive power compensation in industrial grid via high-power adjustable speed drives with medium voltage 3L-NPC BTB converters. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*. 2017, no. 8(4), pp. 1455-1466.
4. Maklakov A.S. Simulation of the main electric drive of the plate mill rolling stand. *Mashinostroenie: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Russian Internet Journal of Industrial Engineering], 2014, no. 3, pp. 16-25. (In Russian)
5. Nikolaev A.A., Gilemov I.G., Bulanov M.V., Kosmatov V.I. Providing Electromagnetic Compatibility of High-Power Frequency Converters with Active Rectifiers at Internal Power Supply System of Cherepovets Steel Mill. XVIII International Scientific Technical Conference Alternating Current Electric Drives (ACED). 2021, pp. 1-8. doi: 10.1109/ACED50605.2021.9462264
6. Nikolaev A.A., Kornilov G.P., Khramshin T.R., Nikiforov G., Mutallapova F.F. Experimental studies of electromagnetic compatibility of modern electric drives in the power supply system of industrial enterprises. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Bulletin of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2016, vol. 14, no. 4, pp. 96-103. (In Russian)
7. Rathnayake H., Khajeh K.G., Zare F., Sharma R. Harmonic analysis of grid-tied active front end inverters for the frequency range of 0-9 kHz in distribution networks: addressing future regulations. IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). 2019, pp. 446-451. doi: 10.1109/ICIT.2019.8755015
8. Franquelo L.G., Nápoles J., Guisado R.C.P., León J.I., Aguirre M.A. A flexible selective harmonic mitigation tech-

- nique to meet grid codes in three-level PWM converters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2007, no. 54(6), pp. 3022-3029. doi: 10.1109/TIE.2007.907045
9. Jing T., Maklakov A., Radionov A., Baskov S., Kulmukhametova A. Research on hybrid SHEPWM based on different switching patterns. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*. 2019, no. 10(4), pp. 1875-1884. doi: 10.11591/ijpeds.v10.i4.pp1875-1884
 10. Moeini A., Zhao H., Wang S. A current reference based selective harmonic current mitigation PWM technique to improve the performance of cascaded H-bridge multilevel active rectifiers. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2018, vol. 65, pp. 727-737. doi: 10.1109/TIE.2016.2630664
 11. Jing T., Maklakov A., Radionov A. Two selective harmonic control techniques applied in 10kV grid with three-level NPC inverter. *IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI)*. Magnitogorsk. 2019, pp. 75-79. doi: 10.1109/PEAMI.2019.8915413
 12. Rocha A.V., França G.J., dos Santos M.E., de Paula H., Cardoso Filho B.J. Improving the performance of protection schemes in three level IGCT-based neutral point clamped converters. *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*. 2010, pp. 2326-2332. doi: 10.1109/ECCE.2010.5617875
 13. Shimada T., Taniguchi K. IGBT/MOSFET hybrid bridge with phase shift and frequency modulation control for a bidirectional series resonant converter. 19th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'17 ECCE Europe). 2017, pp. P.1-P.7. doi: 10.23919/EPE17ECCEurope.2017.8099058
 14. Ioffe I., Iunusov R., Kostylev A. The comparative analysis of processes in active front end (AFE) for cases of different power sources. *IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI)*. 2019, pp. 99-104. doi: 10.1109/PEAMI.2019.8915097
 15. Nikolaev A.A., Gilemov I.G., Bulanov M.V. Influence investigation of electric drive operation mode at a rolling mill FC with AR on the 10kV supply network voltage quality. *International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)*. 2021, pp. 535-540. doi: 10.1109/UralCon52005.2021.9559456
 16. Nikolaev A.A., Gilemov I.G. Improvement of Power Quality in Supply Network with Active Rectifiers by Selecting Optimal Switching Angle Tables of PWM. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2019, no. 4(45), pp. 35-42. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-4\(45\)-35-42](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-4(45)-35-42) (In Russian)
 17. Hitachi Energy Ltd. Available at: <https://www.hitachienergy.com/ru/ru/offering/product-and-system/semiconductors/integrated-gate-commutated-thyristors-igct/asymmetric-and-reverse-conducting> (accessed 01 September 2021)

Николаев А.А., Гилемов И.Г., Малахов О.С. Исследование усовершенствованной системы управления активных выпрямителей преобразователей частоты в составе электроприводов клетей прокатного стана // *Электротехнические системы и комплексы*. 2021. № 4(53). С. 62-68. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-4\(53\)-62-68](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-4(53)-62-68)

Nikolaev A.A., Gilemov I.G., Malakhov O.S. Improved Control System Analysis of Frequency Converters Active Rectifiers as a Part of Rolling Mill Electric Drives. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2021, no. 4(53), pp. 62-68. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-4\(53\)-62-68](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-4(53)-62-68)