

Николаев А.А., Денисевич А.С., Ложкин И.А., Лаптова В.А.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

ПОВЫШЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ С АКТИВНЫМИ ВЫПРЯМИТЕЛЯМИ ПРИ ПРОВАЛАХ НАПРЯЖЕНИЯ И ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЕ С ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧЬЮ

В работе произведена оценка эффективности устойчивости главных электроприводов прокатных станов на базе трехуровневых преобразователей частоты (ПЧ) с активными выпрямителями (АВ) при компенсации провалов напряжения за счет генерации реактивного тока. Представлены результаты моделирования параллельной работы ПЧ с АВ и электросталеплавильного комплекса при перенапряжениях, вызванных коммутацией фильтрокомпенсирующих цепей СТК. Предложен способ повышения устойчивости работы ПЧ с АВ при параллельной работе с дуговой сталеплавильной печью (ДСП) при дополнительных искажениях, вызванных переходными процессами при коммутации СТК и фильтрокомпенсирующих цепей. Современные электроприводы прокатных станов выполняются на основе синхронных двигателей и преобразователей частоты, состоящих из активного выпрямителя и автономного инвертора напряжения. Несимметричные провалы напряжения питающей сети вызывают отключение главных электроприводов, что приводит к экономическим убыткам и браку продукции. Обеспечение устойчивой работы прокатных станов в таких режимах является актуальной задачей. Объект исследования – стан горячей прокатки 1750 ЗАО «ММК Metalurji». В программном пакете Matlab Simulink была разработана математическая модель преобразователя частоты для алгоритмов ШИМ с удалением выделенных гармоник и система диагностики провалов напряжения. На математической модели производились исследования работы активного выпрямителя в номинальном режиме работы и при возникновении провалов напряжения. На математической модели проводился анализ сетевых токов на входе активного выпрямителя и напряжения в звене постоянного тока. Согласно исследованиям, ПЧ с АВ отключается от срабатывания максимальной токовой защиты и при срабатывании защиты минимального напряжения в звене постоянного тока. По результатам моделирования произведен сравнительный анализ работы ПЧ при провалах напряжения при использовании автоматической системы диагностики провалов напряжения. Также сделаны выводы о влиянии параметров регуляторов тока и напряжения системы активного выпрямителя на устойчивость работы ПЧ с АВ при несимметричных провалах напряжения.

Ключевые слова: активный выпрямитель, преобразователь частоты, алгоритмы ШИМ, провалы напряжения, электроприводы прокатного стана, статический тиристорный компенсатор, фильтрокомпенсирующая цепь, дуговая электросталеплавильная печь.

ВВЕДЕНИЕ

Работа главных электроприводов современных прокатных станов характеризуется частыми динамическими режимами, обусловленными технологическим процессом прокатки. В настоящее время в основе данных электроприводов используются преобразователи частоты (ПЧ) с асинхронными или синхронными двигателями. С целью улучшения технико-экономических показателей и снижения влияния на качество электроэнергии питающей сети применяют преобразователи частоты с активными выпрямителями (АВ), которые позволяют осуществлять не только рекуперацию энергии в сеть, но и работать с регулируемым коэффициентом мощности. Активный выпрямитель по своей структуре аналогичен автономному инвертору напряжения и строится на базе полностью управляемых силовых ключей – IGBT-транзисторов или IGCT-тиристоров [1]. Силовые ключи АВ работают в режиме широтно-импульсной модуляции (ШИМ).

Провалы напряжения, возникающие в системах электроснабжения, оказывают значительное влияние на работу ПЧ [2-4]. Под провалом напряжения понимают временное снижение уровня напряжения в конкретной точке электрической системы ниже 10% отно-

сительно исходного или согласованного уровня [2]. Возникновение провалов напряжения обусловлено короткими замыканиями (КЗ) в линиях электропередач, возникающих, как правило, вследствие погодных явлений. Глубина и длительность провала напряжения зависят от множества факторов: мощность энергосистемы, вид КЗ, удаленность потребителя от точки КЗ. В источниках [5, 6] представлен анализ распределения провалов напряжения в питающих сетях исследуемых объектов. Даже небольшие по длительности провалы напряжения могут вызвать отключение ПЧ. Разработка методов по улучшению устойчивости ПЧ является актуальной задачей, потому что аварийный останов прокатного стана в составе непрерывного металлургического комплекса несет серьезный экономический ущерб с необходимостью останова остальных агрегатов и линий производства.

Существует несколько способов повышения устойчивости электроприводов на базе ПЧ-АВ при провалах напряжения: 1) использование статического тиристорного компенсатора сверхмощной дуговой сталеплавильной печи [7]; 2) применение специализированных алгоритмов ШИМ [8, 9]; 3) демпфирование провалов напряжения с помощью снижения мощности, потребляемой главными электроприводами стана [2].

Использование резервов реактивной мощности статического тиристорного компенсатора (СТК) для

компенсации провалов напряжения в питающей сети предусматривает параллельную работу главных электроприводов прокатного стана, выполненных на базе ПЧ с АВ и электросталеплавильного комплекса. При работе электросталеплавильного комплекса возникают дополнительные искажения напряжения на общих шинах, вызванных переходными процессами при включении статического тиристорного компенсатора и фильтрокомпенсирующих цепей, которые оказывают негативное влияние на работу системы управления АВ и могут привести к их отключениям [5, 10].

Перечисленные способы имеют недостаток: в них используются внешние устройства компенсации либо сложные алгоритмы. Это требует модификации системы управления, что трудно осуществить в условиях производства. В работе описан простой способ повышения устойчивости ПЧ-АВ при провалах напряжения за счет кратковременного генерирования реактивного тока с помощью АВ. Реализация данного способа возможна путем задания отрицательной уставки на реактивную составляющую тока, формируемую блоком диагностики провалов напряжения, и не требует изменений структуры системы управления АВ. Также были проведены исследования влияния данного эффекта на стабилизацию работы ПЧ-АВ при вынужденной параллельной работе с дуговой сталеплавильной печью.

ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

В данной работе было произведено моделирование главных приводов стана горячей прокатки 1750 ЗАО «ММК Metalurji». На **рис. 1** представлена упрощенная схема электроснабжения стана. Стан состоит из двух черновых и четырех чистовых клеток. Главная понизительная подстанция завода получает питание по воздушной линии электропередач от районной узловой подстанции. В открытом распределительном устройстве заводской подстанции установлены понизительные трансформаторы 380/34,5 кВ. От двух трансформаторов запитано закрытое распределительное устройство 34,5 кВ, от которого получают питание ПЧ стана. Провалы напряжения возникают в линии 380 кВ, которая проходит в гористой местности, и оказывают влияние на внутризаводской уровень напряжения 34,5 кВ.

На стане применяются синхронные двигатели высокой мощности (до 9,5 МВт для чистовой клетки). Для реализации двенадцатипульсной схемы выпрямления два АВ подключены к двум трансформаторам с углами сдвига напряжения вторичной обмотки относительно первичной 0 и +30° соответственно. Первичная обмотка первого трансформатора соединена последовательно с первичной обмоткой второго трансформатора. Это решение позволяет исключить из гармонического состава сетевого напряжения значимые 5-й и 7-й гармоники и улучшить энергетические показатели электропривода. Звено постоянного тока двух АВ объединено. АВ и автономный инвертор напряжения имеют идентичную структуру и реализованы на полностью управляемых IGCT-тиристорах [11].

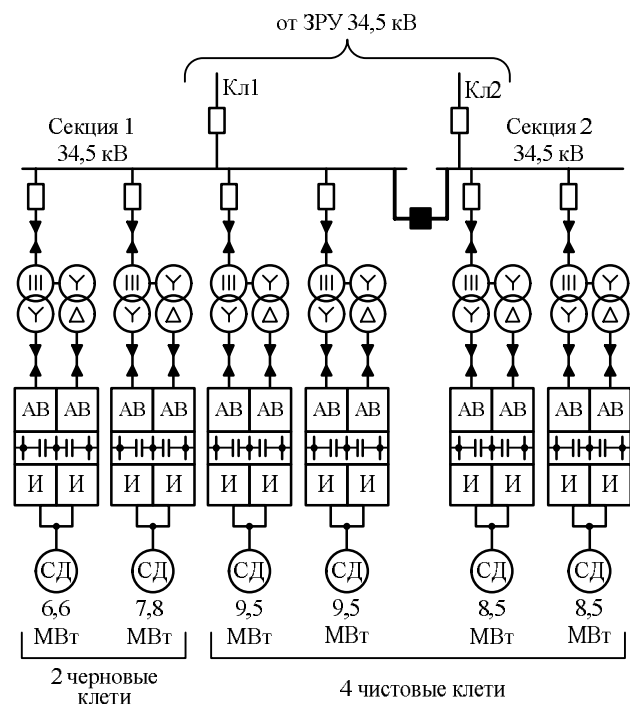


Рис. 1. Упрощенная схема электроснабжения стана 1750 завода ЗАО «ММК Metalurji»

РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ПЧ С АВ

Для проведения исследований были разработаны имитационные модели трехуровневых АВ в программе Matlab-Simulink. Питающая сеть 34,5 кВ представлена идеальным источником напряжения с последовательно подключенным активно-индуктивным сопротивлением. 12-пульсная схема реализована с помощью двух трансформаторов, обеспечивающих сдвиг напряжения на вторичной обмотке 30° относительно друг друга. Реакторы на входах АВ реализованы с помощью активно-индуктивных сопротивлений. Для обеспечения реализации трехуровневой структуры АВ в звене постоянного тока используются два конденсатора с напряжениями 4840/2 В. Эквивалентная нагрузка моделировалась с помощью источника тока в звене постоянного тока [12]. Имитационная модель представлена на **рис. 2**.

Система управления реализована двухконтурной – внутренний контур регулирования токов во вращающейся системе координат dq, внешний – контур регулирования напряжения. Синхронизация с питающим напряжением обеспечивается с помощью блока фазовой автоподстройки частоты [7].

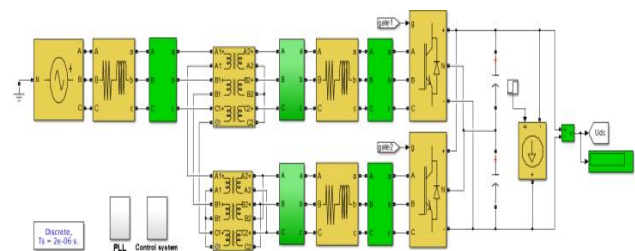


Рис. 2. Имитационная модель, реализованная в Matlab

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ РАБОТЫ ПЧ-АВ
ПРИ ПРОВАЛЕ НАПРЯЖЕНИЯ ГЛУБИНОЙ 30%
И ДЛИТЕЛЬНОСТЬЮ 200 МС ПРИ РАЗЛИЧНОЙ ВЕЛИЧИНЕ
ГЕНЕРИРУЕМОГО РЕАКТИВНОГО ТОКА

На **рис. 3, а** на графике фазных напряжений наблюдается провал напряжения длительностью 200 мс; возникновение однофазного провала напряжения на уровне 30% приводит к снижению напряжения U_{DC} в звене постоянного тока до критического значения **рис. 3, б**.

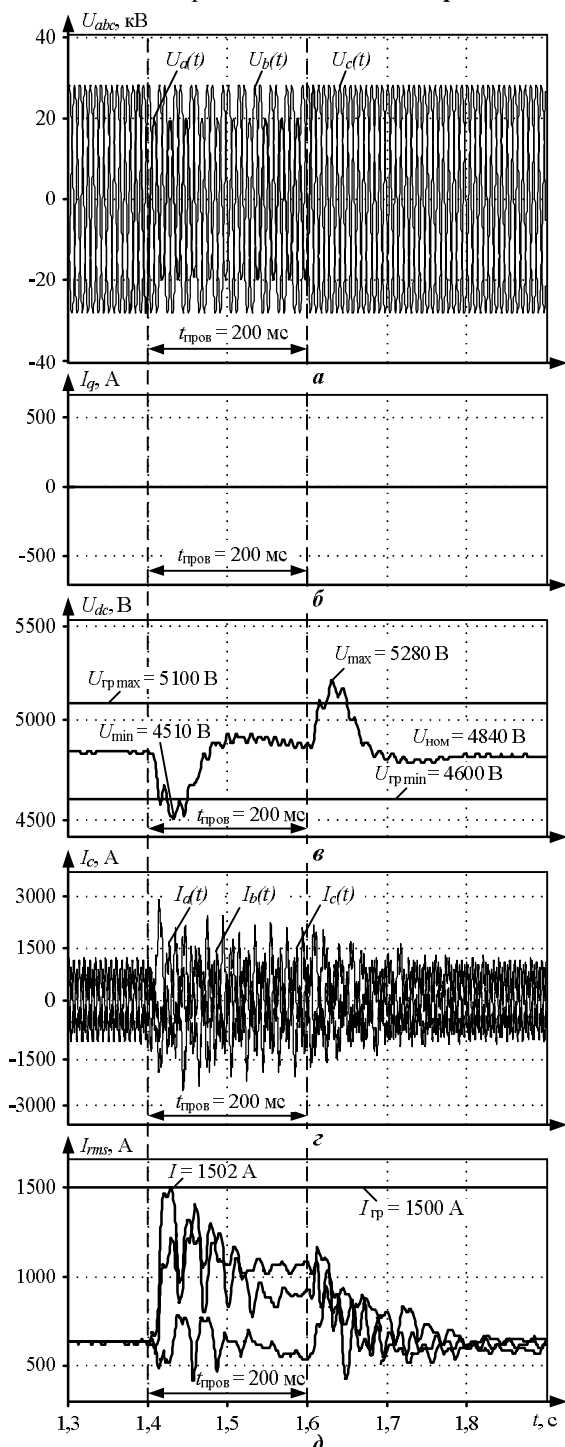


Рис. 3. Графики без компенсации провала напряжения глубиной 30% и длительностью 200 мс: **а** – фазных напряжения на стороне 34,5 кВ; **б** – уставки на реактивную составляющую тока; **в** – напряжение в звене постоянного тока; **г** – фазных токов на входе преобразователя частоты; **д** – действующих значений токов на входе преобразователя частоты

При работе в аварийном режиме наблюдается несимметрия токов на входе АВ, во время провала напряжения питающей сети возникает бросок тока, действующее значение которого превышает уставку срабатывания токовой защиты АВ **рис. 3, г и 3, д**. Уставка на генерацию реактивного тока равна нулю (**рис. 3, в**).

Графики получены на имитационной модели стана горячей прокатки 1750. Напряжение в звене постоянного тока снизилось до 4510 В.

После восстановления напряжения сети наблюдается резкое перерегулирование напряжения в звене постоянного тока до уровня 5280 В. В сетевом токе на протяжении всей длительности провала видна значительная несимметрия токов. Во время провала напряжения происходит значительный бросок тока, действующее значение которого превышает уставку токовой защиты АВ. Таким образом, следует сделать вывод, что при возникновении однофазных провалов напряжений в питающей сети АВ будет отключен либо максимальной токовой защитой при восстановлении нормального режима работы, либо защитой минимального напряжения в звене постоянного тока, либо защитой максимального напряжения в звене постоянного тока [13].

Для компенсации провалов напряжения была разработана система компенсации провалов напряжения в программном продукте MATLAB с приложением Simulink [14]. Во избежание аварийных режимов работы ПЧ с АВ при однофазных провалах напряжения питающей сети генерируется реактивный ток для создания отрицательного падения напряжения на индуктивности понизительного трансформатора. За счет этого повышается напряжение на входе АВ и достигается эффект по стабилизации. На **рис. 4** представлена система автоматической диагностики провалов напряжения. Система в автоматическом режиме формирует сигнал задания на реактивный ток при возникновении провала любой глубины и длительности. Работа блока диагностики основана на анализе ортогональных составляющих напряжения питающей сети. При возникновении несимметрии напряжения составляющая по оси U_{sq} резко возрастает, что фиксируется пороговым элементом, который формирует логическую единицу. Данный сигнал умножается на фиксированную величину уставки $I_q = -600$ А, которая затем поступает в систему управления АВ. Таким образом происходит компенсация провала напряжения питающей сети.

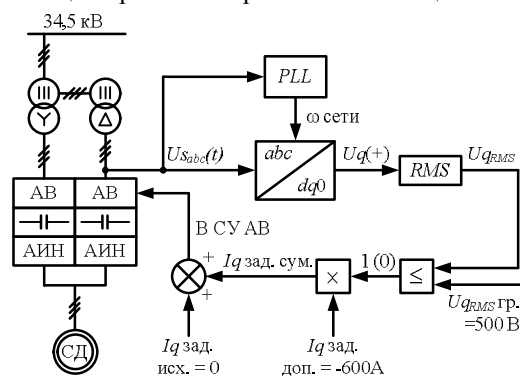


Рис. 4. Система автоматической диагностики провалов напряжения (**abc/dq0** – блок преобразования координат; **RMS** – блок вычисления среднеквадратичного значения; $U_{qRMSгр}$ – граничное значение напряжения срабатывания; $I_{qзад.доп.}$ – дополнительная составляющая сигнала задания на реактивный ток АВ; $I_{aзад.исх}$ – исходная уставка реактивного тока АВ; **PLL** – блок фазовой автоподстройки частоты)

На рис. 5 приведены следующие графики: а) фазные напряжения на стороне 34, 5 кВ, б) уставку на реактивную составляющую тока, равная -600 А, в) график напряжений в звене постоянного тока, г) и д) графики сетевых токов. Следует отметить, что при компенсации провала напряжения с помощью генерации реактивного тока улучшаются графики переходных процессов потребляемых токов и напряжения в звене постоянного тока.

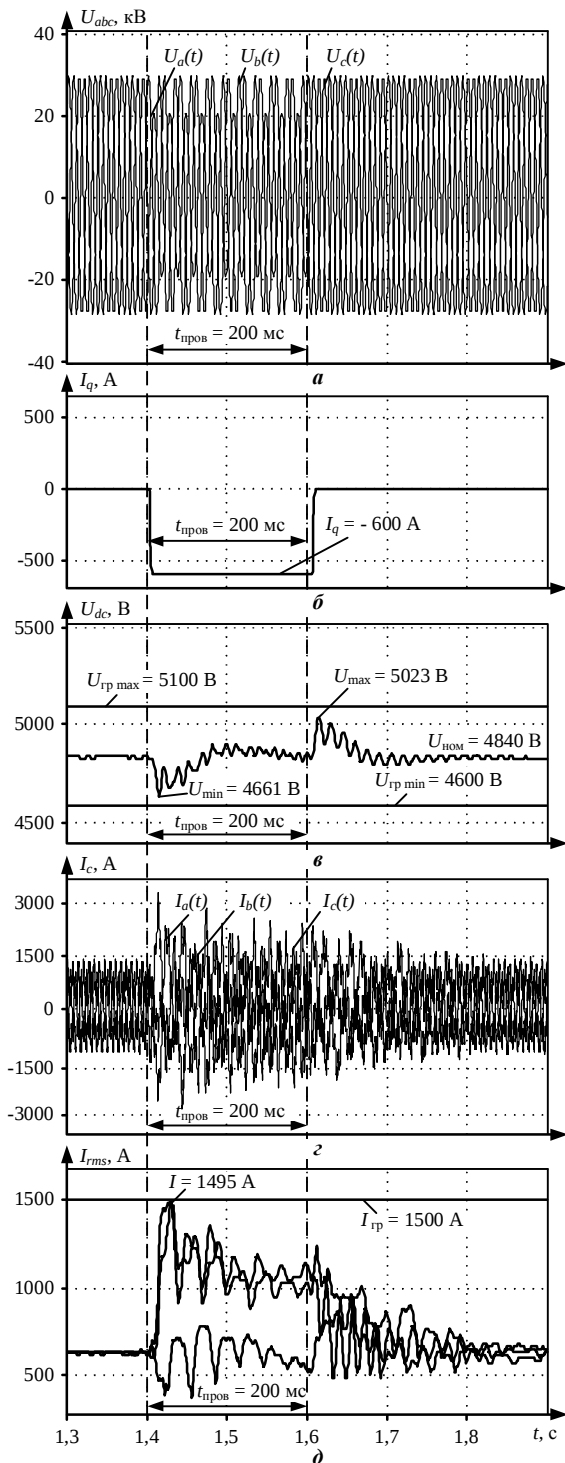


Рис. 5. Графики с компенсацией провала напряжения глубиной 30% и длительностью 200 мс: а – фазных напряжений на стороне 34,5 кВ; б – уставку на реактивную составляющую тока; в – напряжения в звене постоянного тока; г – фазных токов на входе преобразователя частоты; д – действующих значений токов на входе преобразователя частоты

Напряжение в звене постоянного тока практически поддерживается на заданном уровне с небольшими колебаниями. Сетевые токи, потребляемые активным выпрямителем, на протяжении всей длительности провала напряжения остаются на прежнем уровне, сохраняя симметрию по фазам. При восстановлении сети к нормальному режиму наблюдается незначительное увеличение тока, действующее значение которого не превышает уставку срабатывания защиты АВ.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ РАБОТЫ ПЧ С АВ ПРИ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЕ С ЭЛЕКТРОСТАЛЕПЛАВИЛЬНЫМ КОМПЛЕКСОМ

Использование резервов реактивной мощности статического тиристорного компенсатора для компенсации провалов напряжения в питающей сети предусматривает параллельную работу главных электроприводов прокатного стана, выполненных на базе ПЧ с АВ и электросталеплавильного комплекса. [5, 15]. Статический тиристорный компенсатор состоит из тиристорно-реакторной группы и фильтрокомпенсирующих цепей (ФКЦ). При коммутации ФКЦ возникают перенапряжения, величина которых достигает 30% от номинального уровня. Вызванные перенапряжения приводят к аварийному отключению ПЧ с активным выпрямителем (рис. 6) [17]. Из рис. 6 видно, что наиболее устойчивая работа АВ сохраняется при использовании алгоритма ШИМ с фиксированными значениями углов переключения [16]. Это вызвано спецификой данного алгоритма ШИМ, так как регулирование напряжения в звене постоянного тока происходит за счет потребления реактивной составляющей тока из питающей сети. В связи с этим для повышения устойчивости работы ПЧ с АВ при использовании алгоритмов ШИМ, имеющих двухконтурную систему управления, было предложено в момент коммутации ФКЦ обеспечить потребление реактивного тока из питающей сети. В существующую систему управления АВ необходимо добавить блок сравнения средних значений напряжения питающей сети и на входе АВ. Сигнал их рассогласования обрабатывается ПИ-регулятором, на выходе которого формируется сигнал задания тока по реактивной составляющей (рис. 7).

На рис. 8 представлены результаты моделирования параллельной работы ПЧ с АВ и электросталеплавильного комплекса при использовании модернизированной системы управления АВ. Наблюдается заметное улучшение переходных процессов токов, потребляемых АВ и напряжения в звене постоянного тока. Параллельная работа электроприводов прокатного стана на базе ПЧ-АВ с электротехническим комплексом «ДСП-СТК» позволяет решить проблему негативного влияния внешних провалов напряжения на устойчивость работы активных выпрямителей за счет резервов реактивной мощности СТК дуговой печи. Потребление реактивной мощности положительно влияет на работу ПЧ-АВ при алгоритме ШИМ с удалением выделенных гармоник. Это способствует снижению размаха колебаний напряжения в звене постоянного тока. Кроме того, улучшение качества регулирования напряжения в звене постоянного тока приводит к снижению бросков тока, потребляемого АВ.

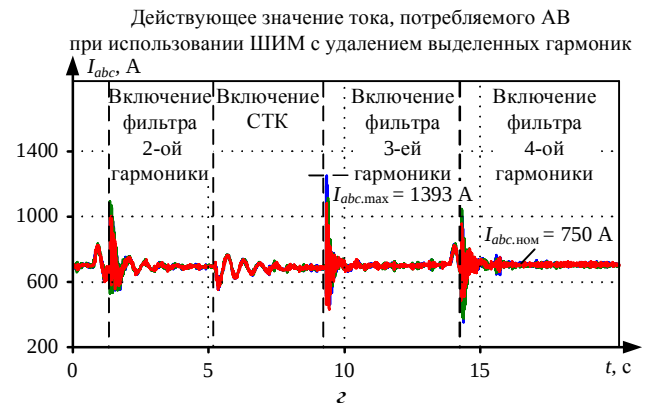
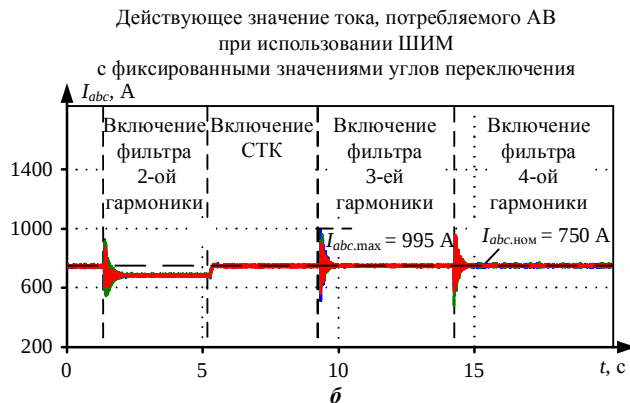
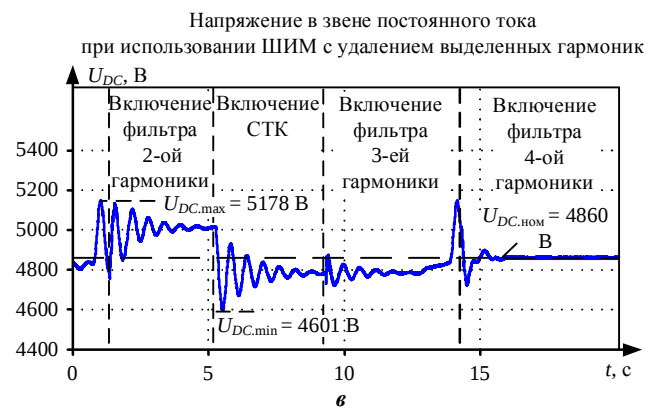
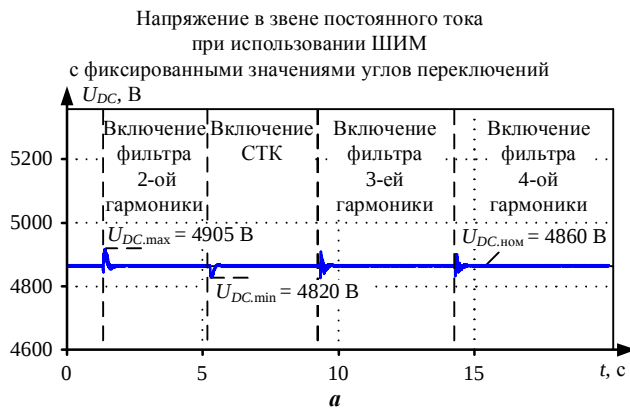


Рис. 6. Кривые напряжения в звене постоянного тока и действующих значений фазных токов, потребляемых АВ: *a, б* – ШИМ с фиксированными значениями углов переключений; *в, г* – ШИМ с удалением выделенных гармоник

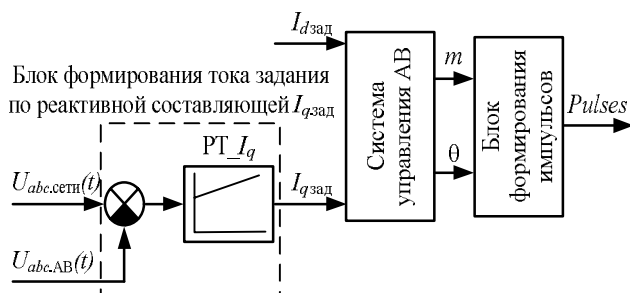


Рис. 7. Упрощенная схема усовершенствованной системы управления активным выпрямителем ($U_{abc,сет}$ – фазные напряжения сети; $U_{abc,AB}$ – фазные напряжения на входе АВ; RT_{I_q} – ПИ-регулятор тока по реактивной составляющей; $I_{d,зад}$ $I_{q,зад}$ – токи задания по активной и реактивной составляющей; m – коэффициент модуляции; θ – угол сдвига; $Pulses$ – импульсы управления тиристорами АВ)

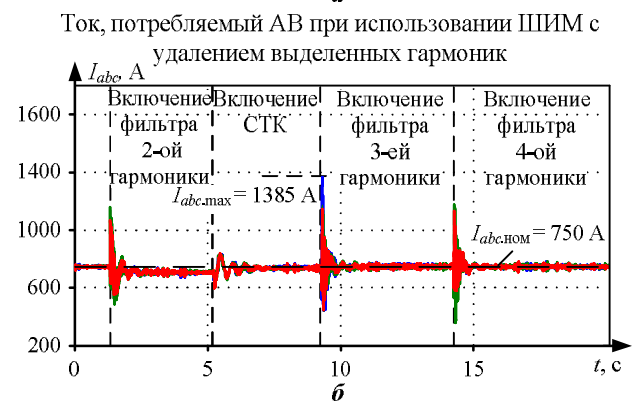


Рис. 8. Графики изменения напряжения в звене постоянного тока и действующих значений фазных токов, потребляемых АВ, при использовании ШИМ с удалением выделенных гармоник и усовершенствованной системы управления АВ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В данной работе проанализированы режимы работы активного выпрямителя при возникновении провалов напряжения. Реализована в программном продукте MATLAB с приложением Simulink математическая модель главного привода стана горячей прокатки 1750 ЗАО «ММК Metalurji» для исследования способа компенсации провала напряжения с помощью кратковременного генерирования переменного тока при провалах напряжения.

2. На математической модели проведены исследования работы активного выпрямителя в нормальном режиме и при возникновении провала напряжения глубиной 30% и длительностью 200 мс. Исследования показали, что отключения АВ могут произойти как от срабатывания максимальной токовой защиты, так и при срабатывании защиты минимального напряжения.

3. По результатам работы видно, что система автоматической диагностики способна компенсировать падение напряжения в звене постоянного тока при провале питающего напряжения.

4. Помимо генерации реактивного тока для компенсации провала также могут применяться дополнительные мероприятия по повышению устойчивости ПЧ с АВ при провалах напряжения, такие как: 1) использование резервов реактивной мощности статического тиристорного компенсатора, функционирующего в системе внутриводского электроснабжения; 2) применение усовершенствованных систем управления АВ, в которых осуществляется формирование дополнительных корректирующих сигналов, обеспечивающих повышение устойчивости работы силового преобразователя при несимметричном питающем напряжении, например применение корректирующего сигнала по напряжениям обратной последовательности в САР АВ; 3) кратковременное снижение мощности электропривода при провале питающего напряжения; 4) использование различных алгоритмов ШИМ. Комбинирование перечисленных методов позволяет достичь наибольшей надежности работы ПЧ с АВ в условиях частых возмущений со стороны питающей сети [18, 19].

5. По результатам моделирования видно, что данный метод повышения устойчивости работы ПЧ с АВ может применяться не только при провалах напряжения, но и при вынужденной параллельной работы с электростале-плавиным комплексом при коммутации ФКЦ.

6. Повышение устойчивости работы ПЧ с АВ достигается за счет потребления реактивного тока из питающей сети. Для этого в существующую систему управления АВ добавлен блок сравнения уровня напряжения питающей сети и напряжения на входе АВ, в котором происходит формирование тока задания по реактивной составляющей.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект № FZRU-2020-0011).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Исследование воздействия активных выпрямителей большой мощности на питающую сеть / Т.Р. Храмшин, Г.П. Корнилов, А.А. Николаев, Р.Р. Храмшин, Д.С. Крубцов // Вестник Ивановского государственного технического университета. 2013. №1. С. 80-83.

- Пупин В.М., Куфтин Д.С., Сафонов Д.О. Анализ провалов напряжений в питающих сетях предприятий и способы защиты электрооборудования // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2011. № 4. С. 35-41.
- Иванов В. И., Арцишевский Я. Л. Методика прогнозирования статистики провалов питающего напряжения в секционированных распределительных сетях электро-снабжения // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2004. № 6. С. 18-22.
- Шпиганович А.Н., Муров И.С. Провалы напряжения в электрических системах предприятий // Национальная ассоциация ученых. 2015. № 2-4 (7). С. 6-7.
- Использование статического тиристорного компенсатора сверхмощной дуговой сталеплавильной печи для обеспечения устойчивости электроэнергетической системы и повышения надежности внутриводского электроснабжения / А.А. Николаев, Г.П. Корнилов, В.С. Ивекеев, И.А. Ложкин, В.Е. Котышев // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2014. №1. С. 1-11.
- Исследование влияния провалов напряжения в системе электроснабжения завода ММК "Metalurji" на работу главных электроприводов стана горячей прокатки / А.А. Николаев, А.С. Денисевич, И.А. Ложкин, М.М. Тухватуллин // Электротехнические системы и комплексы. 2015. №3(28). С. 8-14.
- Николаев А.А., Денисевич А.С., Буланов М.В. Исследование параллельной работы автоматизированных электроприводов прокатного стана и дуговой сталеплавильной печи // Вестник ИГЭУ. 2017. Вып. 3. С. 59-69
- Гасияров В.Р., Радионов А.А., Маклаков А.С. Моделирование трехуровневого преобразователя частоты с фиксированной нейтралью при алгоритме ШИМ с удалением выделенных гармоник // Электротехнические системы и комплексы. 2017. № 1 (34). С. 4-9.
- Маклаков А.С., Радионов А.А. Исследование векторной ШИМ с различными таблицами переключения силовых ключей трехуровневого преобразователя // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. 2015. Т. 2. № 1. С. 30-37.
- Николаев А.А., Денисевич А.С., Ивекеев В.С. Повышение устойчивости преобразователей частоты с активными выпрямителями при коммутациях электрооборудования электростале-плавиного комплекса // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2019. №5. С. 48-58.
- O'Brien K., Teichmann R., Bernet S. Active rectifier for medium voltage drive systems // Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2001. DOI: 10.1109/APEC.2001.911701.
- Маклаков А.С. Имитационное моделирование главного электропривода прокатной клетки толстолистового стана 5000 // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2014. №3. С. 16-25.
- Храмшин Т.Р., Крубцов Д.С., Корнилов Г.П. Математическая модель активного выпрямителя в несимметричных режимах работы // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. 2014. №2. С. 3-9.
- Алгоритм пространственно-векторной модуляции трехуровневого преобразователя / А.С. Маклаков, Е.А. Маклакова, Е.В. Антонова, М.А. Демов // Актуальные вопросы энергетики: материалы Всероссийской научной конференции студентов, магистрантов, аспирантов. 2016. С. 100-106.
- Николаев А.А., Анохин В.В., Урманова Ф.Ф. Разработка способа снижения коммутационных перенапряжений при наличии фильтров высших гармоник статического тиристорного компенсатора // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. 2015. Т.2. №4. С.72-76.
- Николаев А.А., Корнилов Г.П., Денисевич А.С. Разработка усовершенствованной методики расчета параметров

- фильтрокомпенсирующих цепей статического тиристорного компенсатора электродуговой печи // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2018. Т. 18. №4. С. 89-100.
17. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2014. 20 с.
 18. Azeddine Draon, Senior MIEEE A space vector modulation based three-level PWM Rectifier under Simple Sliding Mode Control Strategy // Energy and power Engineering, 2013. No 5. P. 28-35.
 19. Farhan Beg Space Vector Pulse Width Modulation Technique Based Design and Simulation of a Three-Phase Voltage Source Converter System // World Academy of Science, Engineering and Technology. 2014. No 9. P. 1304-1307.

Поступила в редакцию 17 июля 2020 г.

INFORMATION IN ENGLISH

IMPROVING THE STABILITY OF OPERATION OF ELECTRIC DRIVES ON THE BASIS OF FREQUENCY CONVERTERS WITH ACTIVE RECTIFIERS DURING THE EXTERNAL VOLTAGE DROPS AND PARALLEL OPERATION WITH ELECTRIC ARC FURNACE

Alexander A. Nikolaev

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

Alexander S. Denisevich

Graduate student, Department of Automated Electric Drive and Mechatronics, Nosov Magnitogorsk State University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: denisevich993@mail.ru.

Igor A. Lozhkin

Graduate student, Department of Automated Electric Drive and Mechatronics, Nosov Magnitogorsk State University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: i.lozhkin@magtu.ru.

Veronika A. Laptova

Bachelor degree student, Department of Automated Electric Drive and Mechatronics, Nosov Magnitogorsk State University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: nikalaptova@gmail.com.

The article is devoted to the comparative analysis of the effectiveness of the method of generating reactive current during the external voltage drops from the point of view of ensuring the stability of the main electric drives of rolling mills on the basis of three-level frequency converters with active rectifiers. Moreover, the article contains the result of the simulation of parallel operation of the frequency converter with active rectifiers and electric steelmaking complex at overvoltages caused by switching of filter-compensating circuits of the stationary thyristor compensator. These methods are proposed for increasing the stability of the operation of the inverter with active rectifiers when operating in parallel with an electric arc steel-making furnace (EAF) with additional voltage distortions caused by transient processes during switching of the stationary thyristor compensator and filter-compensating circuits. Modern electric drives of rolling mills are usually performed based on powerful synchronous motors and frequency converters consisting of active rectifiers and inverters. Unbalanced voltage drops that occur in the external power supply often lead to break-downs of the main electric drives, which lead to economic losses and defective products. Ensuring stable operation of rolling mills in such modes is an important task. The objects of study are hot rolling mill 1750 of the CJSC "MMK Metalurji". Mathematical models of frequency converters have been developed using by the Matlab-Simulink software for the PWM algorithm with the removal of the selected harmonics and an advanced system for diagnosing of voltage dips. The mathematical models have been used to study the operation of the active rectifier for normal operation mode and during voltage drops. Also on the basis of the mathematical model, the analysis of active rectifier input currents and DC-link voltage has been made. Studies have shown that active rectifier faults can occur by operation of input overcurrent protection or DC-link minimum voltage protection. The

comparative analysis results of working of FC-AR with the method of generating reactive current during the external voltage drops has been presented. In addition, the conclusions about influence of regulators parameters in AR control system on stability of working of FC-ARs for voltage drops situations have been made.

Keywords: active rectifier, frequency converter, pulse-width modulation, algorithms of the PWM, mathematical model, Matlab Simulink, voltage drops, electric drive stability, control system, rolling mill, static var compensator, filter compensating circuit, electric arc furnace.

REFERENCES

1. Khrumshin T.R., Kornilov G.P., Nikolaev A.A., Khrumshin R.R., Krutsov D.S. Research of Influence of High Power Active Rectifiers on Mains Supply. *Vestnik IGJeU* [Bulletin of ISPU], 2013, no.1, pp. 80-83. (In Russian)
2. Pudin V.M., Kuftin D.S., Safonov D.O. Analysis of voltage failures in the supply networks of enterprises and methods of protecting electrical equipment. *Elektrooborudovanie: ekspluatatsiya i remont*. [Electrical equipment: operation and repair], 2011, no. 4, pp. 35-41. (In Russian)
3. Ivanov V.I., ArtsishevskyYa. L. The method of forecasting the statistics of supply voltage failures in the sectional distribution networks of power supply. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Elektromekhanika* [Proceedings of Universities. Electromechanics], 2004, no. 6, pp. 18-22. (In Russian)
4. Shpiganovich A.N., Murov I.S. Voltage dips in the electrical systems of enterprises. *Natsionalnaya Assotsiatsiya Uchenykh* [National Association of Scientists], 2015, no. 2-4 (7), pp. 6-7. (In Russian)
5. Nikolaev A.A., Kornilov G.P., Ivekeev V.S., Lozhkin I.A., Kotyishev V.E. Using of the Static Var Compensator of the

- Ultra-High Power Electric Arc Furnace for Supporting of Electrical Power System Stability and Increasing Reliability of Factory Power Supply. *Mashinostroenie: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Russian Internet Journal of Industrial Engineering], 2014, no.1, pp. 1-11. (In Russian)
6. Nikolaev A.A., Denisevich A.S., Lozhkin I.A., M.M. Investigation of voltage drops influence in the power supply system of the "MMK Metalurji" inworks on the main electric drives of the hot strip mill. *Elektrotekhnicheskiye sistemy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes]. Magnitogorsk, Magnitogorsk State Technical University, 2015, no. 3 (28), pp. 8-14. (In Russian)
7. Nikolaev A.A., Denisevich A.S., Bulanov M.V. Investigation of parallel work of rolling mill automated electric drives and an electric arc furnace. *Vestnik IGEU* [Bulletin of Ivanovo State Power Engineering University], 2017, vol. 3, pp. 59-69. (In Russian)
8. Gasiyarov V.R., Radionov A.A., Maklakov A.S. Simulation of 3L NPC Converter with selective harmonic elimination PWM. *Elektrotekhnicheskiye sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2017, no. 1 (34), pp. 4-9. (In Russian)
9. Maklakov A.S., Radionov A.A., Study of SVPWM with various vector selection tables of three level converter. *Elektrotekhnika: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Russian Internet Journal of Electrical Engineering], 2015, vol. 2, no. 1, pp. 30-37. (In Russian)
10. Nikolaev A.A., Denisevich A.S., Ivekeev V.S. Increase in stability of operation of frequency converters with active rectifiers at the commutations of electric equipment of an electric steel-smelting complex. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta* [Bulletin of Ivanovo State Power Engineering University], 2019, no. 5, pp. 48-58. (In Russian)
11. O'Brien K., Teichmann R., Bernet S. Active rectifier for medium voltage drive systems // Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2001. APEC. DOI: 10.1109/APEC.2001.911701.
12. Maklakov A.S. Simulation of the Main Electric Drive of the Mill Rolling Stand. *Mashinostroenie: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Russian Internet Journal of Industrial Engineering], 2014, vol. 2, no. 3, pp. 16-25. (In Russian)
13. Khrumshin T.R., Krubtsov D.S., Kornilov G.P. Mathematical model of the active rectifier under unbalanced voltage operation conditions. *Elektrotekhnika: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Russian Internet Journal of Electrical Engineering], 2014, vol. 1, no. 2, pp. 3-9. (In Russian)
14. Maklakov A.S., Maklakova E.A., Antonova E.V., Demov M.A. Space Vector Modulation algorithm of three-level Converter. *Aktualnye voprosy energetiki: materialy Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii studentov, magistrantov, aspirantov* [Topical issues of energy: materials of the all-Russian scientific conference of students, masters, postgraduate students], 2016, pp. 100-106. (In Russian)
15. Nikolaev A.A., Anokhin V.V., Urmanova F.F. Developing of new method of switching over voltage reduction in harmonic filters of static var compensator. *Elektrotekhnika: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Russian Internet Journal of Electrical Engineering], 2015, vol.2, no. 4, pp. 72-76. (In Russian)
16. Nikolaev A.A., Kornilov G.P., Denisevich A.S. Developing of a new calculation method for harmonic filters parameters of arc furnace static var compensator. *Vestnik YuUrGU. Seriya «Energetika»* [Bullen of the South Ural State University. Power Engineering series], 2018, vol. 18, no. 4, pp. 89-100. (In Russian)
17. GOST 32144-2013. Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 20 p. (In Russian)
18. AzeddineDraon, Senior Mieee A space vector modulation based three-level PWM Rectifier under Simple Sliding Mode Control Strateg. *Energy and power Engineering*, 2013, no. 5, pp. 28-35.
19. Farhan Beg Space Vector Pulse Width Modulation Technique Based Design and Simulation of a Three-Phase Voltage Source Converter System. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 2014, no. 9, pp. 1304-1307.

Повышение устойчивости преобразователей частоты с активными выпрямителями при провалах напряжения и параллельной работе с дуговой сталеплавильной печью / А.А. Николаев, А.С. Денисевич, И.А. Ложкин, В.А. Лаптова // Электротехнические системы и комплексы. 2020. № 3(48). С. 33-40. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-3\(48\)-33-40](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-3(48)-33-40)

Nikolaev A.A., Denisevich A.S., Lozhkin I.A., Laptova V.A. Improving the Stability of Operation of Electric Drives on the Basis of Frequency Converters with Active Rectifiers During the External Voltage Drops and Parallel Operation with Electric Arc Furnace. *Elektrotekhnicheskiye sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2020, no. 3(48), pp. 33-40. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-3\(48\)-33-40](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-3(48)-33-40)