

Николаев А.А., Гилемов И.Г., Денисевич А.С.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ АЛГОРИТМОВ ШИМ АКТИВНЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ МНОГОУРОВНЕВЫХ ПЧ НА УСТОЙЧИВОСТЬ РАБОТЫ ПРИ ПРОВАЛАХ НАПРЯЖЕНИЯ

В работе произведена сравнительная оценка эффективности различных алгоритмов широтно-импульсной модуляции для активных выпрямителей мощных трехуровневых преобразователей частоты главных электроприводов прокатных станов с позиции обеспечения устойчивой работы при внешних провалах напряжения. Современные электроприводы прокатных станов, как правило, выполняются на основе мощных синхронных двигателей и преобразователей частоты, состоящих из активного выпрямителя и автономного инвертора напряжения. Несимметричные провалы напряжения, возникающие во внешней питающей сети, часто вызывают отключение главных электроприводов, что приводит к экономическим убыткам: браку продукции и простоем оборудования. Обеспечение устойчивой работы прокатных станов в таких режимах является актуальной задачей. Объектами исследования были выбраны непрерывный стан холодной прокатки 2000 ЛПЦ-11 ПАО «ММК» и стан горячей прокатки 1750 ЗАО «ММК Metalurji». Были разработаны математические модели преобразователей частоты в программном пакете Matlab Simulink для следующих алгоритмов ШИМ: классического, векторного, с удалением выделенных гармоник и с фиксированными углами переключения. На математической модели производились исследования работы активного выпрямителя в номинальном режиме работы и при возникновении однофазных провалов напряжения глубиной 30% и длительностью 200 мс. На математической модели проводился анализ сетевых токов на входе активного выпрямителя и напряжения в звене постоянного тока. Исследования показали, что отключение ПЧ с АВ может произойти как от срабатывания максимальной токовой защиты, так и при срабатывании защиты минимального напряжения в звене постоянного тока. По результатам моделирования произведен сравнительный анализ работы ПЧ при провалах напряжения с использованием различных алгоритмов ШИМ. 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, широтно-импульсная модуляция, алгоритмы ШИМ, математическая модель, Matlab Simulink, провал напряжения, устойчивость, система управления, прокатный стан.

### ВВЕДЕНИЕ

Работа главных электроприводов современных прокатных станов характеризуются 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 не только осуществлять 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 IGBT-тиристоров [4]. Силовые ключи АВ работают в режиме широтно-импульсной модуляции (ШИМ).

Провалы напряжения, возникающие в системах электроснабжения, оказывают значительное влияние на работу ПЧ [1,3,6]. Под провалом напряжения понимают временное снижение уровня напряжения в конкретной точке электрической системы ниже 10% относительно исходного или согласованного уровня [2]. Провалы напряжения обусловлены короткими замыканиями (КЗ) в линиях электропередач, возникающими, как правило, вследствие погодных явлений. Глубина и длительность провала напряжения зависят от множества факторов, таких как мощность энергосистемы, вид КЗ, удаленность потребителя от точки КЗ. В ис-

точниках [1, 3] представлен анализ распределения провалов напряжения в питающих сетях исследуемых объектов. Учитывая то, что даже небольшие по длительности провалы напряжения могут вызвать отключение ПЧ, разработка методов по улучшению устойчивости ПЧ в таких режимах является актуальной задачей. Важно отметить, что аварийный останов прокатного стана в составе непрерывного металлургического комплекса несет серьезный экономический ущерб с необходимостью останова остальных агрегатов и линий производства.

В работе представлена оценка различных алгоритмов ШИМ с точки зрения улучшения устойчивости ПЧ при провалах напряжения.

### ОПИСАНИЕ СУЩЕСТВУЮЩИХ АЛГОРИТМОВ ШИМ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ АКТИВНЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ МОЩНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ

Выделяют четыре основных алгоритма ШИМ, применяемых в АВ: классический (синусоидальный) ШИМ, векторная ШИМ, ШИМ с удалением выделенных гармоник и ШИМ с фиксированными углами переключения. Рассмотрим каждый алгоритм подробнее.

В классическом алгоритме ШИМ сигнал задания синусоидальной формы сравнивается с пилообразным опорным напряжением. Для трехуровневых АВ используются два пилообразных опорных напряжения для положительной и отрицательной полуволн. Полученные логические сигналы обрабатываются и формируются импульсы управления на силовые ключи. [3] Данный алгоритм ШИМ применяется относительно редко.

В основе векторного алгоритма ШИМ лежит принцип минимизации потерь при переключении силовых

ключей АВ. Все возможные комбинации силовых ключей АВ представляются в виде плоскости, задавая пространственный вектор необходимого напряжения АВ, система управления определяет сектор и регион. На основании этих данных определяются три базовых вектора и длительности включения каждого из них для получения необходимого вектора напряжения. После формируются импульсы управления силовыми ключами [10–12]. Данный алгоритм применяется в ПЧ фирмы Siemens (например, в Siemens S120).

В ШИМ с удалением выделенных гармоник углы переключения рассчитываются заранее и зависят от сигнала задания с системы управления. Расчет углов производится таким образом, чтобы исключить из потребляемого тока определенные гармоники. Для «двенадцатипульсовой схемы» подлежат исключению гармоники 11, 13, 23 и 25 [9]. Данный алгоритм ШИМ для переключения силовых ключей АВ используется в ПЧ компании АВВ, в частности, в серии ACS6000 [6].

Алгоритм ШИМ с фиксированными углами переключения используется в ПЧ фирмы ТМЕИС [3]. Углы переключения силовых ключей рассчитываются заранее. Критерием, на основании которого производится расчет, является минимальная величина активных потерь в транзисторах и ограничение высших гармоник тока. В ШИМ с фиксированными углами переключения происходит фиксация амплитуды напряжения на входе АВ и изменение фазы напряжения по отношению к фазе питающего напряжения. Таким образом, регулирование активной составляющей тока осуществляется за счет изменения реактивной.

ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

В данной работе было произведено моделирование главных приводов непрерывного стана холодной прокатки 2000 ЛПЦ-11 ПАО «ММК» и стана горячей прокатки 1750 ЗАО «ММК Metalurji».

На рис. 1 представлена упрощенная схема электроснабжения стана 2000.

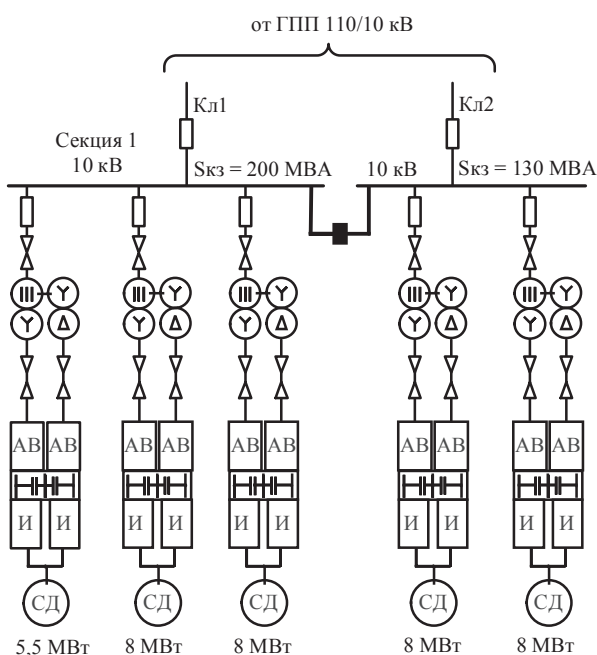


Рис. 1. Упрощенная схема электроснабжения стана 2000 ЛПЦ-11 ПАО «ММК»

Стан состоит из 5 клеток. На стане применяются синхронные двигатели фирмы АВВ мощностью 8 МВт (5,5 МВт для первой клетки) и преобразователи частоты серии ACS 6000. Для реализации двенадцатипульсовой 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 и 7 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 IGBT-тиристорах. Стан получает питание по двум кабельным линиям от подстанции 110/10 кВ.

Аналогично реализован стан горячей прокатки 1750, упрощенная схема электроснабжения которого представлена на рис. 2. 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 внутривзаводской уровень напряжения 34,5 кВ.

РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ПЧ С АВ

Для проведения исследований были разработаны имитационные модели трехуровневых АВ в программе Matlab/Simulink. Имитационная модель представлена на рис. 3.

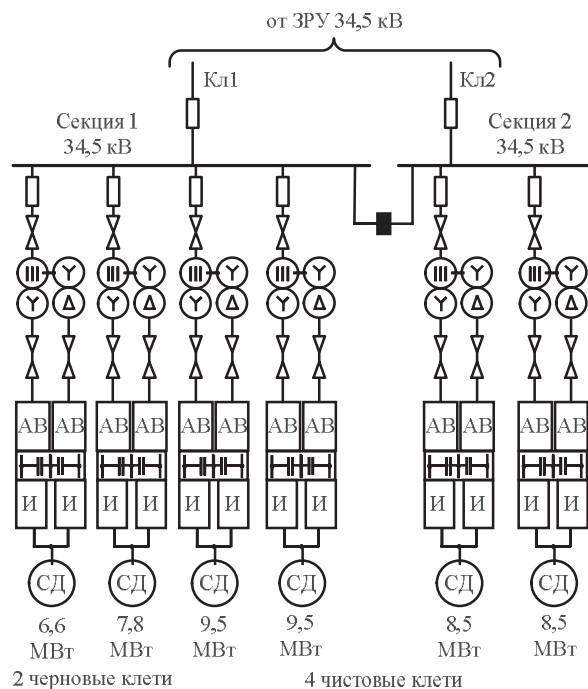


Рис. 2. Упрощенная схема электроснабжения стана 1750 завода ЗАО «ММК Metalurji»

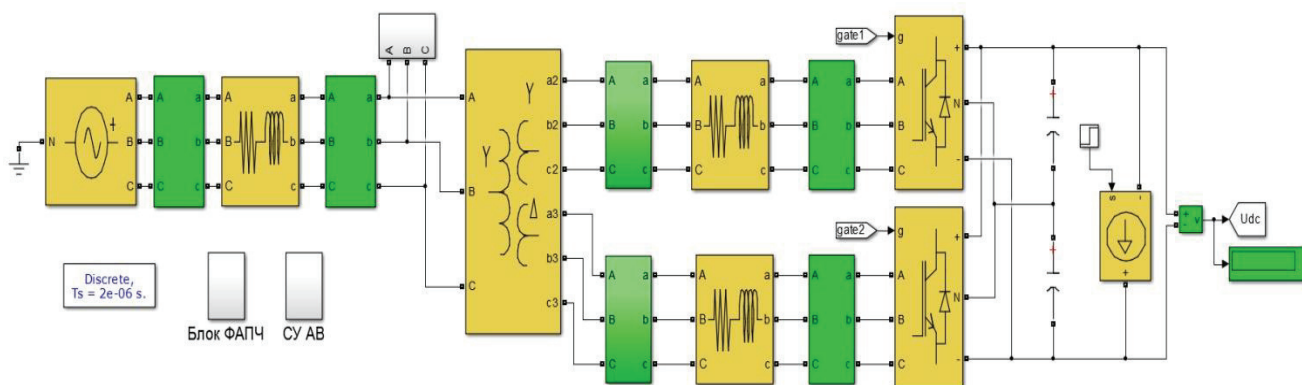


Рис. 3. Имитационная модель, реализованная в Matlab

Питающая сеть 10 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  $30^\circ$  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 [5].

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

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ДЛЯ СТАНА ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ 2000 ЛПЦ-11 ПАО «ММК»

На рис. 4 представлены напряжение в звене постоянного тока ПЧ (а) и сетевой ток (б) при провале напряжения глубиной 30% и длительностью 200 мс при использовании синусоидального алгоритма ШИМ АВ, полученные на имитационной модели непрерывного стана холодной прокатки 2000.

Напряжение в звене постоянного тока снизилось до 4703 В и поддерживалось на том же уровне до завершения провала. После восстановления напряжения сети наблюдается резкое перерегулирование напряжения в звене постоянного тока до уровня 5124 В. В сетевом токе на протяжении всей длительности провала видна значительная несимметрия токов. После завершения провала происходит значительный бросок тока, действующее значение которого превышает уставку токовой защиты АВ.

Однофазный провал напряжения вызывает падение напряжения в звене постоянного тока ПЧ (рис. 5, а) при использовании АВ ШИМ с фиксированными углами переключения до 3565 В, что вызовет срабатывание защиты по минимальному напряжению. Сетевой ток (рис. 5, б) при этом характеризуется значительной несимметрией и в несколько раз превышает номинальный. Величина напряжения в звене постоянного тока после завершения переходного процесса поддерживается на уровне величины задания с значительными

колебаниями, достигающими 7-10%. После восстановления питающего напряжения происходит возрастание напряжения в звене постоянного тока, напряжение при этом достигает значения 5848 В.

При использовании алгоритма ШИМ с удалением выделенных гармоник (рис. 6, а, б) провал напряжения в питающей сети вызывает снижения напряжения в звене постоянного тока до 4708 В, затем система управления стремится обеспечить заданный уровень напряжения. Уровень колебаний напряжения относительно низок и не превышает 2%. При восстановлении напряжения питающей сети происходит перерегулирование величины напряжения в звене постоянного тока до 4986 В, что находится в допустимых пределах. Сетевой ток характеризуется значительной несимметрией на всей длительности провала, достигая максимальной величины в 5155 А после завершения провала, что превышает уставку срабатывания токовой защиты ПЧ.

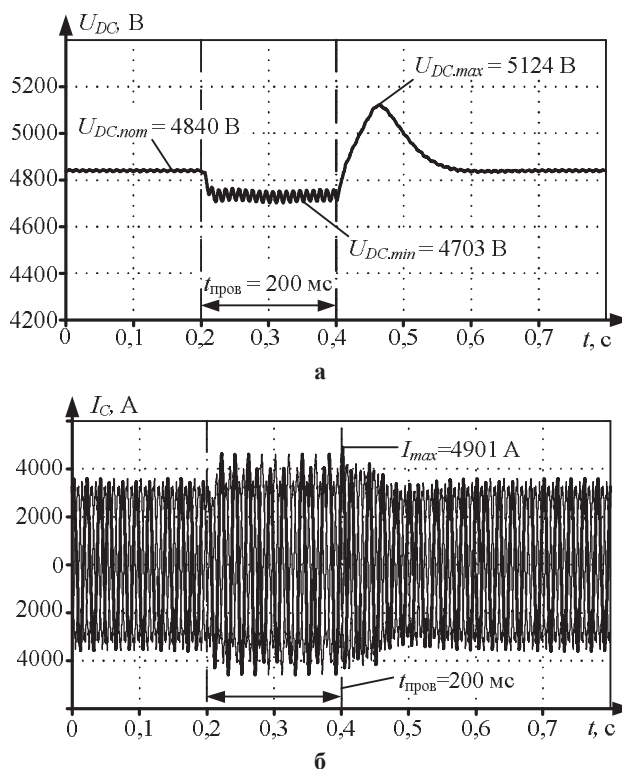
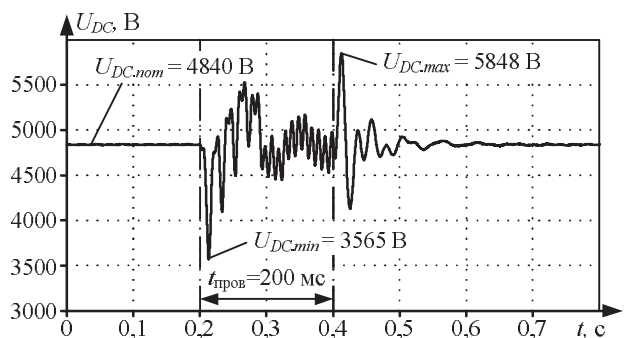
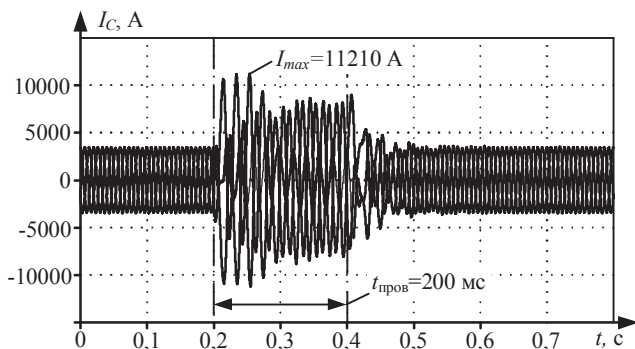


Рис. 4. Напряжение в звене постоянного тока (а) и сетевой ток (б) ПЧ при использовании синусоидального алгоритма ШИМ АВ

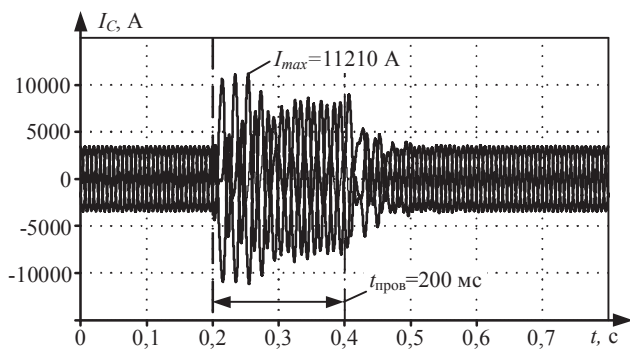


а

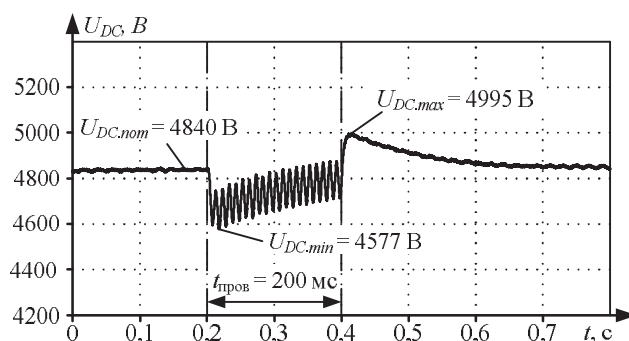


б

Рис. 5. Напряжение в звене постоянного тока (а) и сетевой ток (б) ПЧ при использовании алгоритма ШИМ АВ с фиксированными углами переключения

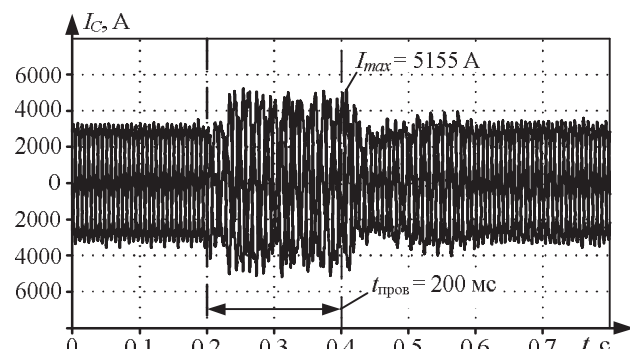


а



б

Рис. 7. Напряжение в звене постоянного тока (а) и сетевой ток (б) ПЧ при использовании векторного алгоритма ШИМ АВ



а

Рис. 6. Напряжение в звене постоянного тока (а) и сетевой ток (б) ПЧ при использовании алгоритма ШИМ АВ с удалением выделенных гармоник

На рис. 7 представлены осциллограммы напряжения в звене постоянного тока (рис. 7, а) и сетевого тока ПЧ (рис. 7, б) при использовании векторного алгоритма ШИМ для переключения ключей АВ при провале

напряжения питающей сети. Напряжение в звене постоянного тока достигает минимальной величины в 4577 В при провале напряжения и максимальной – 4995 В при восстановлении питающего напряжения. Система управления стремится обеспечить поддержание напряжения на уровне величины задания. Ток АВ характеризуется сильной несимметрией. Величина сетевого тока достигает максимального значения в 4633 А, что не превышает уставку токовой защиты.

Для удобства сравнения результаты исследований для электропривода стана 2000 холодной прокатки сведены в табл. 1. В таблице отражены величины максимального отклонения величины напряжения в звене постоянного тока  $\delta U_{DCmax}$ , % от номинальной величины и сетевого тока  $\delta I_{ACmax}$ , %, также время переходного процесса  $t_{ПП}$  при возникновении и устранении провала напряжения. В табл. 1 подчеркнуты значения величин отклонения напряжения в звене постоянного тока и сетевого тока, приводящие к срабатыванию защиты.

Таблица 1

Сравнение работы АВ при различных алгоритмах ШИМ при провале напряжения для стана 2000

Алгоритм ШИМ	$\delta U_{DCmax}$ , %	$\delta I_{ACmax}$ , %	$t_{ПП}$ , мс
При возникновении провала напряжения			
Синусоидальный	2,77	42,5	20
С фиксир. углами	<u>26,3</u>	<u>228</u>	100
С удалением выд. гарм.	2,72	<u>66</u>	120
Векторный	5,43	38,5	300
При устранении провала напряжения			
Синусоидальный	5,5	<u>50,3</u>	150
С фиксир. углами	20,9	<u>162</u>	100
С удалением выд. гарм.	3,01	<u>65</u>	170
Векторный	3,2	33,1	150



Таким образом, только векторный алгоритм ШИМ, использованный для переключения силовых ключей АВ, обеспечивает безаварийную работу привода при однофазном провале напряжения глубиной 30% и длительностью 200 мс.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ДЛЯ СТАНА 1750 МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ЗАВОДА ЗАО «ММК METALURJ»

Аналогичные исследования были произведены также и для стана горячей прокатки 1750. На рис. 8 представлены осциллограммы напряжения в звене постоянного тока (а) и сетевого тока (б) ПЧ при провале напряжения питающей сети длительностью 200 мс и глубиной 30% при использовании для переключения силовых ключей АВ синусоидального алгоритма ШИМ. Как видно из рис. 8, а, данный алгоритм не позволяет системе управления обеспечить при провале поддержание напряжения в звене постоянного тока на уровне задания. Минимальная величина напряжения постоянного тока составила 4450 В. После восстановления питающего напряжения произошел резкий скачок напряжения до уровня 5100 В, величина сетевого тока при этом достигла максимального значения в 1900 А, что вызовет срабатывание максимального-токовой защиты.

Однофазный провал напряжения при использовании ШИМ с фиксированными углами переключения вызывает падение напряжения в звене постоянного тока до уровня в 4300 В (рис. 9, а). После завершения провала происходит перерегулирование напряжения до 5240 В. Колебания напряжения в звене постоянного тока на всей длительности провала не превышают 2 % от величины номинального значения напряжения. Максимальная величина потребляемого ПЧ тока достигает значения в 1700 А при возникновении провала (рис. 9, б). Данное значение недопустимо и превышает уставку срабатывания токовой защиты.

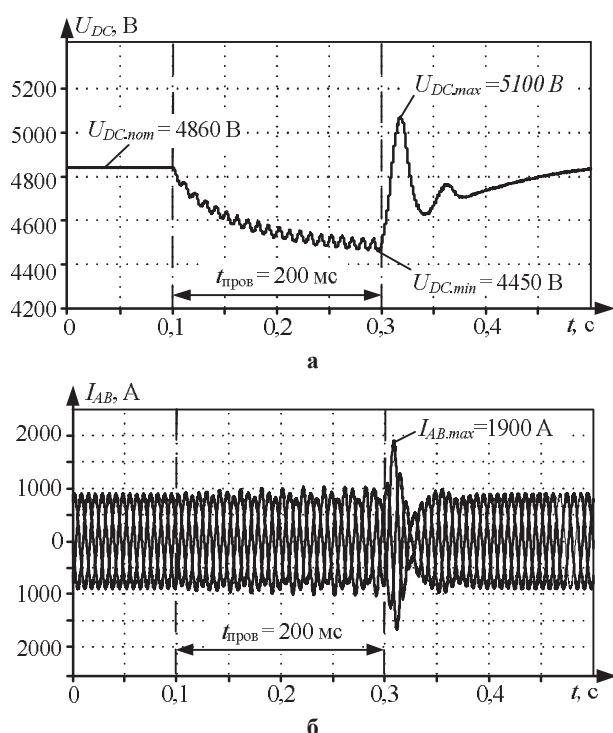


Рис. 8. Напряжение в звене постоянного тока (а) и сетевого ток (б) ПЧ при использовании синусоидального алгоритма ШИМ АВ

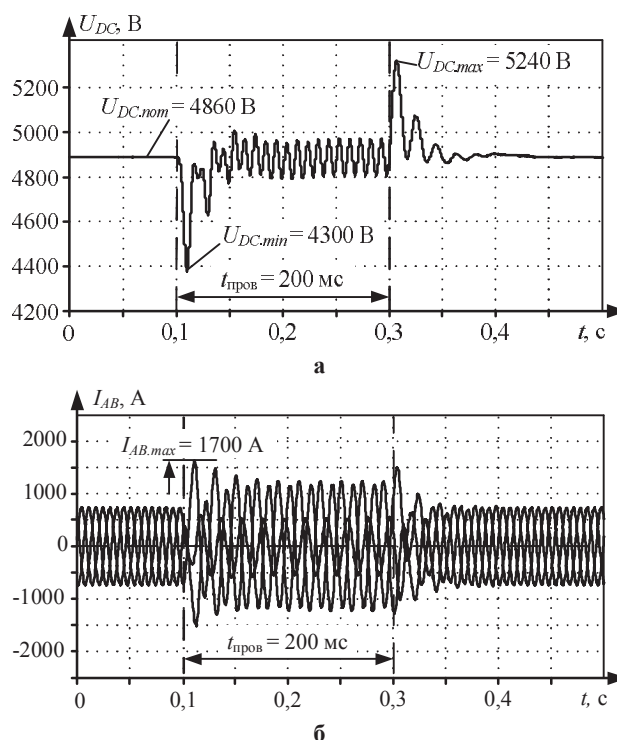


Рис. 9. Напряжение в звене постоянного тока (а) и сетевого ток (б) ПЧ при использовании алгоритма ШИМ АВ с фиксированными углами переключения

Однофазный провал питающего напряжения глубиной 30% и длительностью 200 мс приводит к снижению уровня напряжения в звене постоянного тока до 4600 В, а также увеличению размаха колебаний напряжения до 7-10% от номинального значения, при использовании для управления силовыми ключами АВ ШИМ с удалением выделенных гармоник (рис. 10, а). При восстановлении напряжения сети наблюдается увеличение напряжения в звене постоянного тока до 5250 В. В токах, потребляемых АВ (рис. 10, б), на протяжении всей длительности провала напряжения наблюдается значительная несимметрия по фазам, а также броски тока, действующее значение которых превышает уставку срабатывания токовой защиты ПЧ.

На рис. 11 а, б представлены графики переходных процессов сетевых токов и напряжения в звене постоянного тока ПЧ при возникновении однофазного провала напряжения при использовании для управления тиристорами АВ векторного алгоритма ШИМ. Как видно из рис. 11, а, в момент возникновения провала напряжения происходит снижение уровня напряжения в звене постоянного тока до 4600 В, затем система управления АВ пытается поддерживать напряжение в звене постоянного тока на заданном уровне за счет увеличения потребляемых токов АВ. При этом размах колебаний напряжения в звене постоянного тока превышает 10% от номинала. В кривых мгновенных значения токов (рис. 11, б), потребляемых АВ, при возникновении однофазного провала напряжения наблюдается увеличение потребляемых токов, а также их сильная несимметрия по фазам. Максимальное значение потребляемого АВ тока составило 2000 А при восстановлении питающего напряжения, что превышает уставку срабатывания токовой защиты ПЧ и приведет к аварийному останову привода прокатной клетки стана.

Таблица 2

Сравнение работы АВ при различных алгоритмах ШИМ при провале напряжения для стана 2000

Алгоритм ШИМ	$\delta U_{DCmax}, \%$	$\delta I_{ACmax}, \%$	$t_{ПП}, \text{мс}$
При возникновении провала напряжения			
Синусоидальный	8,44	7,5	250
С фиксир. углами	4,94	<u>66</u>	100
С удалением выд. гарм.	11,5	<u>144</u>	50
Векторный	5,35	<u>143</u>	150
При устранении провала напряжения			
Синусоидальный	4,9	<u>110</u>	150
С фиксир. углами	5,97	<u>122</u>	100
С удалением выд. гарм.	7,82	<u>65</u>	50
Векторный	8,01	<u>88,1</u>	50

В табл. 2 подчеркнуты значения величин отклонения напряжения в звене постоянного тока и сетевого тока, приводящие к срабатыванию защиты. Таким образом, в случае для электропривода прокатной клетки стана горячей прокатки 1750 не один из алгоритмов ШИМ для переключения силовых ключей АВ не обеспечивает безаварийную работу привода при однофазном провале напряжения глубиной 30 % и длительностью 200 мс.

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 непрерывного стана холодной прокатки 2000 ЛПЦ-11 ПАО «ММК» и стана горячей прокатки 1750 ЗАО «ММК Metalurji» для исследования влияния различных алгоритмов ШИМ на устойчивость работы АВ при провалах напряжения.

2. На математической модели проведены исследования работы активного выпрямителя в нормальном режиме и при возникновении провалов 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 первой модели видно, что все алгоритмы ШИМ кроме синусоидального способны компенсировать падение напряжения в звене постоянного тока при провале питающего напряжения. Только векторный алгоритм ШИМ при прочих равных параметрах обеспечивает работу АВ при провале напряжения. Все алгоритмы ШИМ второй модели вызывают срабатывание максимальной токовой защиты.

4. Значительное влияние на характер переходных процессов токов и напряжения в звене постоянного тока ПЧ при провалах напряжения оказывает настройка системы автоматического регулирования напряжения и токов. Настройка регуляторов, обеспечивающая снижение просадки напряжения в звене постоянного тока при провале напряжения, вызывает увеличение токов на входе АВ в момент провала, поэтому необходима качественная настройка регуляторов для безаварийной работы.

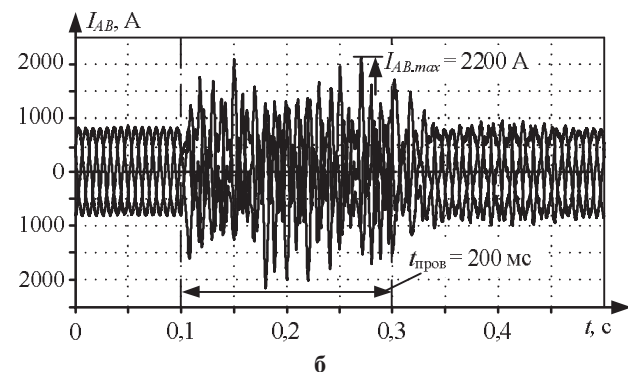
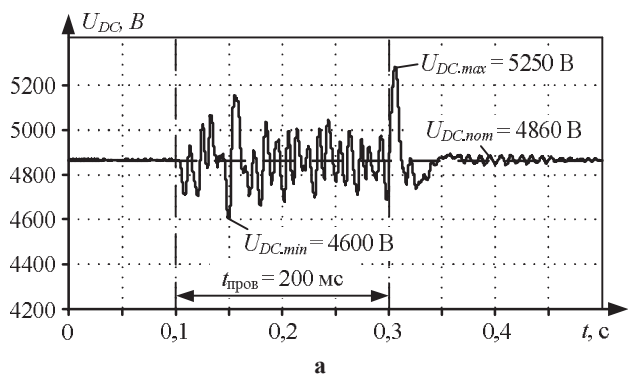


Рис. 10. Напряжение в звене постоянного тока (а) и сетевой ток (б) ПЧ при использовании алгоритма ШИМ АВ с удалением выделенных гармоник

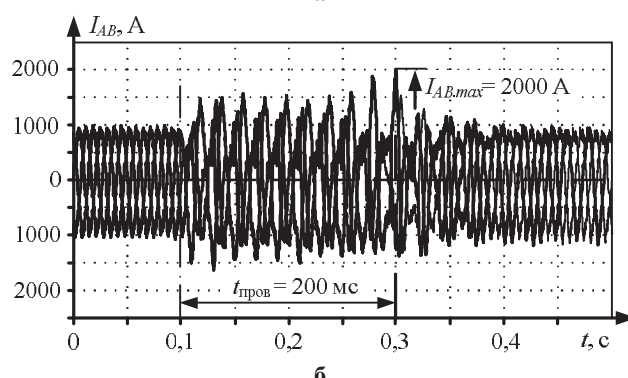
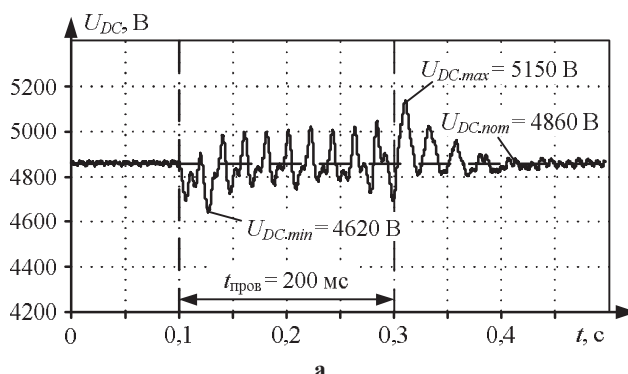


Рис. 11. Напряжение в звене постоянного тока (а) и сетевой ток (б) ПЧ при использовании векторного алгоритма ШИМ АВ

Для удобства сравнения результаты исследований для горячей прокатки стана 1750 сведены в табл. 2. В таблице отражены максимальные отклонения величины напряжения в звене постоянного тока  $\delta U_{DCmax}, \%$ , и сетевого тока  $\delta I_{ACmax}, \%$ , от номинальной величины, также время переходного процесса  $t_{ПП}$  при возникновении и устранении провала напряжения.

5. Помимо выбора правильного алгоритма ШИМ и качественной настройки системы регулирования 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 напряжению обратной последовательности в САР АВ; 3) кратковременное снижение мощности электропривода при провале питающего напряжения. Комбинирование перечисленных методов позволяет достичь наибольшей надежности работы ПЧ с АВ в условиях частых возмущений со стороны питающей сети.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Использование статического тиристорного компенсатора сверхмощной дуговой сталеплавильной печи для обеспечения устойчивости электроэнергетической системы и повышения надежности внутриводского электроснабжения / Николаев А.А., Корнилов Г.П., Ивекеев В.С., Ложкин И.А., Котышев В.Е. // *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал*. 2014. №1. С.1-11.
2. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2014. 20 с.
3. Николаев А.А. Повышение эффективности работы электротехнического комплекса «дуговая сталеплавильная печь – статический тиристорный компенсатор». Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2017. 318 с.
4. Исследование воздействия активных выпрямителей большой мощности на питающую сеть / Храмшин Т.Р., Корнилов Г.П., Николаев А.А., Храмшин Р.Р., Крубцов Д.С. // *Вестник Ивановского государственного технического университета*. 2013. №1. С.80-83.
5. Маклаков А.С. Имитационное моделирование главного электропривода прокатной клети толстолистового стана 5000 // *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал*. 2014. №3. С. 16-25.
6. 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.
7. Крубцов Д.С., Храмшин Т.Р., Корнилов Г.П. Способы управления активными выпрямителями главных электроприводов прокатных станов // *Актуальные проблемы современной науки, техники и образования*. 2013. № 71. С. 3-6.
8. Храмшин Т.Р., Крубцов Д.С., Корнилов Г.П. Оценка методов широтно-импульсной модуляции напряжения активных выпрямителей прокатных станов // *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал*. 2013. №2. С. 48-52.
9. Гасяров 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.
10. Алгоритм пространственно-векторной модуляции трехуровневого преобразователя / Маклаков А.С., Маклакова Е.А., Антонова Е.В., Демов М.А. // *Актуальные вопросы энергетики: материалы Всероссийской научной конференции студентов, магистрантов, аспирантов*. Омск, 2016. С. 100-106.
11. Azeddine Draon, Senior Mieee A space vector modulation based three-level PWM Rectifier under Simple Sliding Mode Control Strategy // *Energy and power Engineering*, 2013. №5. P. 28-35.
12. 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. №9. P. 1304-1307

Поступила в редакцию 22 мая 2018 г.

INFORMATION IN ENGLISH

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF DIFFERENT ACTIVE PWM RECTIFIERS ALGORITHMS ON THE ELECTRIC DRIVES STABILITY UNDER VOLTAGE DROPS CONDITIONS

Alexander A. Nikolaev

Ph.D. (Eng.), 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>.

Ildar G. Gilemov

Master degree student, Department of Automated Electric Drive and Mechatronics, Nosov Magnitogorsk State University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: gilemov.ig@outlook.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2481-3378>.

Alexander S. Denisevich

Postgraduate student, Department of Automated Electric Drive and Mechatronics, Nosov Magnitogorsk State University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: denisevich993@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4913-4224>.

The paper includes the comparative analysis of efficiency of different pulse width modulation (PWM) algorithms implemented in active rectifiers (AR) of high-power three-level frequency converters (FC) of main rolling mills electric drives in terms of providing stability during external voltage drops. Modern electric drives of rolling mills are usually developed on the basis of 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 breakdowns of the main electric drives, which leads to economic losses: defective products and downtime. Ensuring stable operation of rolling mills in such modes is an important task. The objects of study are continuous cold rolling mill 2000 of the PJSC "MMK" and 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 following PWM algorithms: classical, vector, selective harmonic elimination and fixed pulse pattern control. The mathematical models have been used to study the operation of the active rectifier for normal operation mode and for single-phase voltage drops with a depth of 30% and a duration of 200 ms. 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 AR 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 different PWM algorithms for voltage drops conditions based has been presented. Also the conclusions about the 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, mathematical model, voltage drops, electric drive stability, control system, rolling mill.

REFERENCES

1. 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 ehlektronnyj nauchnyj zhurnal* [Russian Internet Journal of Industrial Engineering], 2014, no.1, pp. 1-11. (In Russian)
2. 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)
3. Nikolaev A.A. *Povyshenie effektivnosti elektrotehnicheskogo kompleksa "dugovaya staleplavilnaya pech – staticheskii tiristornii kompensator"* [Improving the Efficiency of Electrotechnical Complex of Electric Arc Furnace and the Static Var Compensator] Magnitogorsk, MSTU Publ., 2017.
4. Khramshin T.R., Kornilov G.P., Nikolaev A.A., Khramshin R.R., Krubtsov D.S. Research of Influence of High Power Active Rectifiers on Mains Supply. *Vestnik IGJeU* [Journal of ISPU], 2013, no.1, pp. 80-83. (In Russian)
5. Maklakov A.S. Simulation of the Main Electric Drive of the Mill Rolling Stand. *Mashinostroenie setevoy ehlektronnyj nauchnyj zhurnal* [Russian Internet Journal of Industrial Engineering], 2014, vol.2, no.3, pp. 16-25. (In Russian)
6. Hramshin T.R., Krubtsov D.S., Kornilov G.P. Mathematical model of the active rectifier under unbalanced voltage operation conditions. *Elektrotehnika setevoy ehlektronnyj nauchnyj zhurnal* [Russian Internet Journal of Electrical Engineering], 2014, vol. 1, no. 2, pp. 3-9. (In Russian)
7. Krubtsov D.S., Hramshin T.R., Kornilov G.P. Active rectifiers control methods of main drive of rolling mills. *Aktualnye problemy sovremennoj nauki, tekhniki i obrazovaniya* [Actual problems of modern science, technology and education], 2013, no. 71, pp. 3-6. (In Russian)
8. Hramshin T.R., Krubtsov D.S., Kornilov G.P. Evaluation of methods PWM voltage active rectifiers rolling mills. *Mashinostroenie setevoy ehlektronnyj nauchnyj zhurnal* [Russian Internet Journal of Industrial Engineering], 2013, no.2, pp. 48-52. (In Russian)
9. Gasiyarov V.R., Radionov A.A., Maklakov A.S. Simulation of 3L NPC Converter with selective harmonic elimination PWM. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2017, no. 1 (34), pp. 4-9. (In Russian)
10. Maklakov A.S., Maklakov E.A., Antonova E.V. Space Vector Modulation algorithm of three-level Converter. *Aktualnye voprosy ehnergetiki: materialy Vserossijskoj nauchnoj konferencii studentov, magistrantov, aspirantov* [Topical issues of energy: materials of the all-Russian scientific conference of students, masters, postgraduates]. Omsk, 2016, pp. 100-106. (In Russian)
11. Azeddine Draon, 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.
12. 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.

Николаев А.А., Гилемов И.Г., Денисевич А.С. Анализ влияния различных алгоритмов ШИМ активных выпрямителей многоуровневых ПЧ на устойчивость работы при провалах напряжения // *Электротехнические системы и комплексы*. 2018. № 3(40). С. 55-62. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-3\(40\)-55-62](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-3(40)-55-62)

Nikolaev A.A., Gilemov I.G., Denisevich A.S. Analysis of the Influence of Different Active PWM Rectifiers Algorithms on the Electric Drives Stability under Voltage Drops Conditions. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2018, no. 3(40), pp. 55-62. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-3\(40\)-55-62](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2018-3(40)-55-62)