

<sup>1</sup> Южно-Уральский государственный университет, Челябинск<sup>2</sup> Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова<sup>3</sup> Московский политехнический университет

## СХЕМЫ ПОДКЛЮЧЕНИЯ К СЕТИ МОЩНЫХ РЕКУПЕРАТИВНЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ КЛЕТЕЙ ПРОКАТНЫХ СТАНОВ

Рекуперативные электроприводы переменного тока широко используются в металлургическом прокатном производстве благодаря их надёжности, экономичности и достаточной мощности для поддержания технологического процесса. В этой статье представлен обзор последних достижений в области построения силовых схем подключения к питающей сети данных электроприводов. В статье рассматриваются многопульсные схемы подключения, образованные различными типами трансформаторов, алгоритмы предварительно запрограммированной широтно-импульсной модуляции с удалением выделенных гармонических составляющих трёхуровневых активных выпрямителей напряжения, приводятся результаты практических измерений. Результаты экспериментальных исследований получены в распределительной сети металлургического комбината ЧерМК «Северсталь», имеющей в своём составе мощные электроприводы клетей стана холодной прокатки на базе преобразователей частоты с активными выпрямителями. Оба преобразователя частоты электроприводов клетей имеют одинаковую мощность – 14 МВт. Один преобразователь частоты электропривода реализован по 6-пульсной схеме, а другой по 12-пульсной. Запись мгновенных значений фазного тока трансформаторов, питающих электроприводы стана, осуществлялась с помощью портативного регистратора Flash Recorder и токовых клещей Fluke 43В. Частота дискретизации записываемых сигналов при этом составила 30 кГц. Показаны формы и спектры фазных токов сети в 6- и 12-пульсных схемах на действующем оборудовании, рассчитаны коэффициенты гармонических искажений до 60-й и 150-й гармоники при различных шаблонах предварительно запрограммированной широтно-импульсной модуляции с удалением выделенных гармонических составляющих. Ожидается, что эта статья может дать широкий обзор многопульсных схем подключения главных рекуперативных электроприводов переменного тока клетей прокатных станков, в частности, определить современные решения, которые могут значительно улучшить электромагнитную совместимость с питающей энергосистемой. Представленные результаты могут быть использованы исследователями и инженерами для обеспечения электромагнитной совместимости нелинейных потребителей в аналогичных схемах, а также для их проектирования.

**Ключевые слова:** силовая преобразовательная техника, электропривод, широтно-импульсная модуляция, качество напряжения, многопульсные схемы подключения

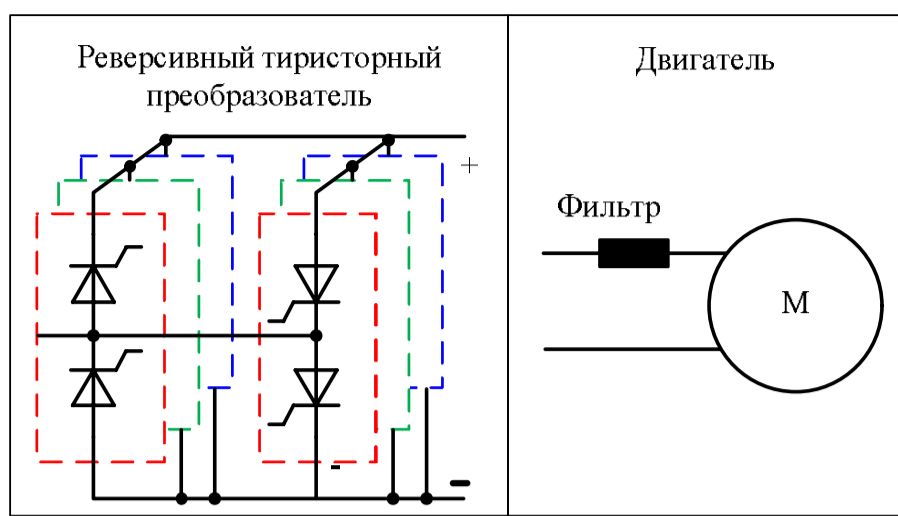
### ВВЕДЕНИЕ

Устойчивое развитие энергосберегающих технологий в промышленности привело к широкому распространению систем силовой преобразовательной техники с возможностью рекуперации электрической энергии для высокомоментных приложений. До середины 20-го века они основывались на полууправляемых тиристорных преобразователях для регулирования электроприводов постоянного и переменного тока (рис. 1, а). Начиная с середины 20-го века и по наше время, им на смену пришли полностью управляемые многоуровневые преобразователи на транзисторах или запираемых тиристорах (рис. 1, б). К настоящему времени большинство всех современных металлургических электроприводов клетей прокатных станков выполняются на основе синхронных или асинхронных двигателей переменного тока и, как правило, активных выпрямителей напряжения (АВН) в составе преобразователей частоты [1–4].

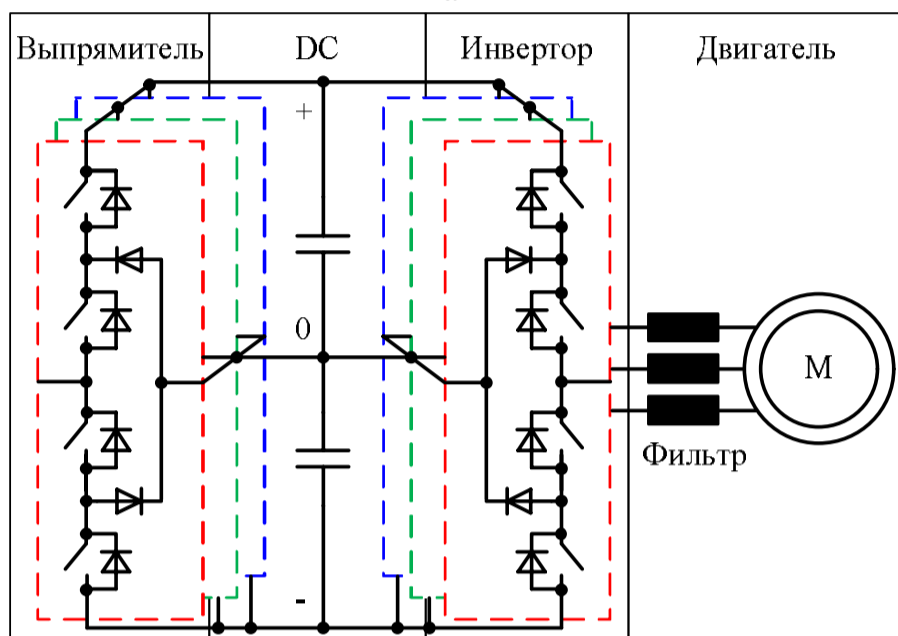
Полупроводниковые модули АВН переключаются с помощью различных алгоритмов широтно-импульсной модуляции (ШИМ), что приводит к несинусоидальности выходного переменного напряжения

и, как следствие, к проблемам обеспечения электромагнитной совместимости между потребителем и источником. Из-за этих проблем введены стандарты и руководства [5–8], на которые должны опираться фирмы-производители оборудования и пользователи. Если индуктивность вторичных обмоток питающих трансформаторов недостаточна для поддержания стабильной работы АВН, то рекомендуются пассивные  $L$ - или  $LC$ -фильтры для дополнительной установки в уже существующие системы со стороны сети. Однако характеристики этих фильтров близки к характеристикам преобразователя частоты, что не только увеличивает их стоимость, но также увеличивает потери и количество компонентов, а это приводит к снижению надёжности системы [9–13].

Коммутационные потери и электромагнитная совместимость с питающей сетью являются наиболее значительными проблемами для главных рекуперативных электроприводов переменного тока (РЭП ПТ) клетей прокатных станков с АВН, номинальные мощности которых достигают десятков мегаватт. Они становятся причинами перегревов или полного выхода из строя электронного оборудования в точке общего подключения к сети. Исследователями и специалистами были разработаны различные способы и методы снижения влияния этих проблем [14–18].



a



b

Рис. 1. Рекуперативные электроприводы клеток прокатных станов: а – устаревшее решение; б – современное решение

Известным подходом повышения качества преобразованной электроэнергии полупроводниковыми преобразователями является разработка многоуровневых топологий. Производители многоуровневых преобразователей рекомендуют их для управления мощными потребителями электрической энергии в диапазоне от десятков до сотен мегаватт [19–22].

Однако, как оказалось, увеличение уровней выходного напряжения преобразователя приводит и к увеличению количества полупроводниковых компонентов, что снижает надежность и эффективность работы преобразователя.

Среди всех многоуровневых топологий наиболее распространённым и компромиссным решением является трёхуровневая топология с диодной фиксацией уровня (с англ. neutral-point-clamped (NPC)) [23], представленная на рис. 2.

Суммарное напряжение звена постоянного тока  $U_{dc}$  преобразователя с диодной фиксацией уровня распределяется в равном соотношении по эквивалентным ёмкостям звена постоянного тока  $C_1, C_2$ . Положительный и отрицательный уровни напряжения на входе преобразователя  $U_{an}$  формируются при протекании тока через два последовательно соединённых полупроводниковых модуля  $S_{1a}, S_{2a}$  или  $\bar{S}_{1a}, \bar{S}_{2a}$ , которыми могут быть либо полностью управляемые ключи, либо диоды. Нулевой (третий) уровень напряжения внутренней ЭДС преобразователя  $U_{an}$  формируется при протекании тока через полностью управляемые ключи  $S_{1a}$  или  $\bar{S}_{2a}$  и фиксирующие диоды  $D_{1a}$  или  $D_{2a}$ .

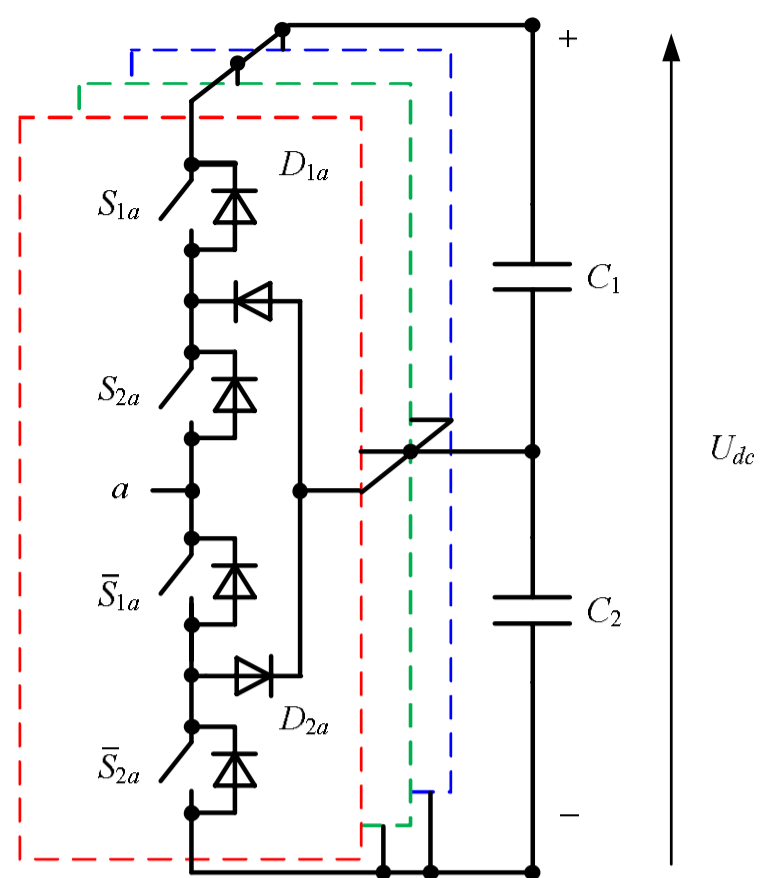


Рис. 2. Фазная стойка трёхуровневого преобразователя с диодной фиксацией уровня

Следующим способом снижения негативного влияния полупроводниковых преобразователей является выбор оптимального алгоритма ШИМ. Предварительно запрограммированная ШИМ (ПЗШИМ) была определена основным методом ШИМ для АВН в составе преобразователей частоты главных РЭП ПТ клетей прокатных станов на основе анализа достаточного количества научной литературы и опыта научно-исследовательской работы на реальных производственных объектах. Алгоритмы ПЗШИМ переключают полупроводниковые модули АВН по предварительно рассчитанным последовательностям переключений, формируя сигнал внутренней ЭДС АВН с требуемыми показателями качества. С момента своего появления ПЗШИМ вызвала огромный исследовательский интерес для управления переключением полупроводниковых ключей высокомоощных АВН на низких частотах в диапазоне от 150 до 450 Гц. Низкая коммутационная способность является следствием ограниченных возможностей полупроводниковой базы в области номинальных мощностей свыше мегаватта. Повышение частоты переключения приводит к перегреву полупроводниковых модулей, что, как следствие, требует дополнительного усиленного охлаждения, существенно снижая эффективность и надежность работы преобразователя [24–26].

Последним эффективным методом уменьшения отрицательного влияния работы силовых полупроводниковых преобразователей на показатели качества питающего напряжения, в частности на коэффициент гармонических искажений (КГИ) и коэффициенты отдельных гармонических составляющих напряжений и токов, является использование многопульсных схем подключения к питающей сети. Многопульсные схемы решают сразу две важные задачи: наращивают суммарные мощности системы и улучшают электромагнитную совместимость. Трансформаторы являются основными компонентами многопульсных схем. В 2007 году Сингх и др. [27] провели всесторонний обзор

многопульсных схем, охватывающих большое количество конфигураций трансформаторов. В 2020 году Jie Chen и др. [28] актуализировали этот обзор, сконцентрировав внимание для применения схем подключений к сети на основе многообмоточных трансформаторов для различных типов летательных аппаратов. Тем не менее в опубликованных обзорных статьях основное внимание уделялось только однонаправленным преобразователям малой мощности на основе диодных выпрямителей и уже морально устаревшим двунаправленным тиристорным преобразователям. Многие из рассмотренных технических решений не используются для силовых схем подключения к питающей сети главных РЭП ПТ клетей прокатных станов. Что еще более важно, в современных системах электропривода следует рассматривать не только достоинства той или иной многопульсной схемы подключения или характеристики многообмоточного трансформатора, а сразу несколько факторов, связанных с выбором топологии преобразователей, методов ШИМ и параметров питающей энергосистемы. Подобным комплексным исследованиям недостаточно уделяется внимание в научной литературе.

Основная цель статьи – дать обзор последних достижений в области построения силовых схем подключения к питающей сети главных РЭП ПТ прокатных станов. В данной статье будут представлены 6-, 12- и 18-пульсные схемы подключения к питающей сети и технологии, применимые в данных решениях. Более сорока статей [1–46] были проанализированы в области топологий построения высокоомощных преобразователей, методов и алгоритмов ШИМ, многопульсных схем подключения. Несмотря на то, что основная цель работы сосредоточена только на используемых в РЭП

ПТ схемах для прокатных станов, результаты также подойдут для других систем автоматизированного электропривода переменного тока, статических компенсаторов реактивной мощности, гибких систем передачи переменного тока и высоковольтных линий электропередач постоянного тока. Представленные результаты могут быть использованы исследователями и инженерами для обеспечения электромагнитной совместимости нелинейных потребителей в аналогичных схемах и для их проектирования.

СИЛОВЫЕ СХЕМЫ ГЛАВНЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ КЛЕТЕЙ ПРОКАТНЫХ СТАНОВ

Первыми в данном разделе будут рассмотрены 6-пульсные схемы (рис. 3), применяющиеся для главных электроприводов сортового проволочного стана и стана холодной прокатки 1700. Они являются наиболее простыми, состоят из однообмоточного трансформатора, двунаправленного преобразователя частоты с АВН, выполненного по трёхуровневой топологии с диодной фиксацией уровня, выходного L-фильтра и приводного двигателя переменного тока [29–33]. Обмотки трансформаторов имеют нулевой сдвиг между первичными и вторичными напряжениями и соединяются по типам звезда/звезда (см. рис. 3, а) или треугольник/треугольник (см. рис. 3, б). 6-пульсная схема имеет значимыми коэффициенты  $6n \pm 1$  ( $n$  – любое положительное целое число) гармонических составляющих потребляемого тока. ПЗШИМ с частотой 350 Гц обычно применяется для АВН, но при усиленном охлаждении возможно повысить частоту до 450 Гц. Основные технические характеристики рассматриваемой схемы подключения представлены в таблице.

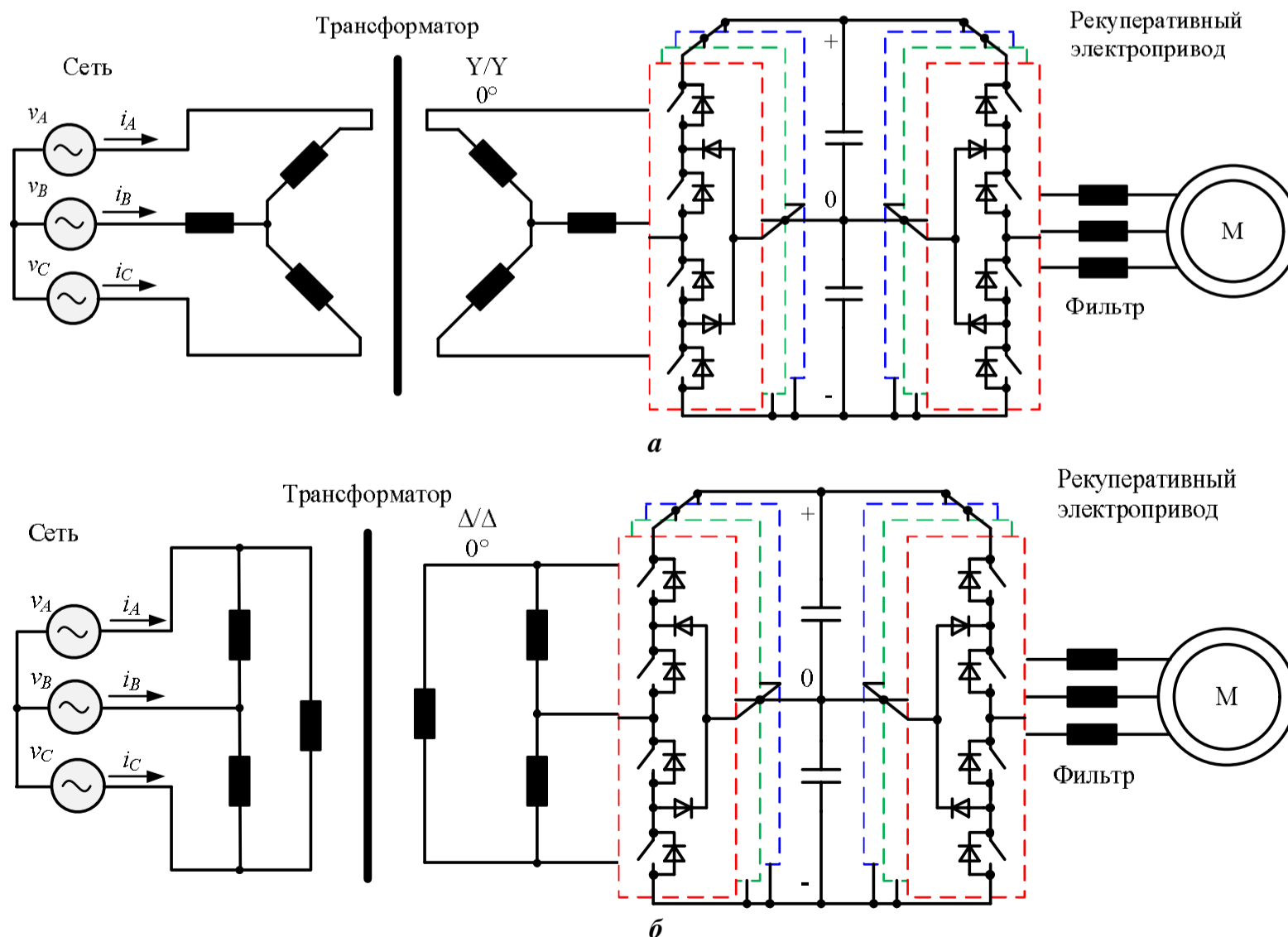


Рис. 3. 6-пульсные схемы подключения к питающей сети главных РЭП ПТ клетей прокатных станов: а – стан холодной прокатки; б – сортовой волочильный стан

Основные технические данные схем подключения к питающей сети главных РЭП ПТ клетей прокатных станов

Номер рисунка	Мощность электропривода, кВт	Мощность трансформаторов, кВА	Схемы соединения обмоток трансформаторов	Напряжения трансформаторов, кВ	Средняя частота ПЗШИМ, Гц
Рис. 3, а	12000	12000	Y/Y	10 / 3,3	250-350
Рис. 3, б	14000	14000	Δ/Δ		
Рис. 4	14000	14000	Y/Δ-Y		
Рис. 6	18000	20000	Δ/Δ; Δ/Δ; Δ/Δ		
Рис. 7	18000	18000	Y/Δ-Зигзаг-Зигзаг		

Следующими наиболее часто встречаемыми схемами являются 12-пульсные. На **рис. 4** показаны схемы подключения к питающей сети главных электроприводов клетей стана 2000 холодной прокатки и стана 1750 горячей прокатки. 12-пульсная схема имеет значимыми только коэффициенты  $12n \pm 1$  гармонических составляющих потребляемого тока. Это достигается благодаря использованию фазосдвигающего трансформатора с последовательным соединением первичных обмоток [34-37]. Одну вторичную обмотку такого трансформатора соединяют звездой, а другую – треугольником, создавая тем самым сдвиг вторичных напряжений на  $30^\circ$ . Вторичные обмотки подключаются к отдельным АВН, работающим с ПЗШИМ на частоте 250-350 Гц.

Основным требованием для подавления гармоник в 12-пульсной схеме является сбалансированная нагрузка двух АВН. В этом случае коэффициенты  $12n \pm 1$  генерируемых АВН гармоник будут иметь одинаковую амплитуду и подавляться благодаря трансформаторам. Это снижает требования к дополнительной фильтрации потребляемого тока по сравнению с 6-пульсной схемой. Из особенностей схемы можно отметить следующее (см. **рис. 4**): 1) фазовый сдвиг вторичных напряжений на  $30^\circ$  образуется в двух независимых магнитных системах трансформатора, что позволяет снизить электрические потери в магнитопроводе; 2) звено по-

стоянного тока двух преобразователей частоты объединено, что позволяет поддерживать заданный уровень в общей шине DC при отключении транзисторов одного из АВН; 3) последовательное соединение первичных обмоток фазосдвигающего трансформатора позволяет разделить между ними поровну напряжение сети. Основные технические характеристики схемы представлены в **таблице**.

На **рис. 5** показаны 12-пульсные схемы, которые также можно встретить в металлургическом прокатном производстве [38–41]. Схема на **рис. 5, а** строится на основе одного многообмоточного трансформатора, вторичные обмотки которого со сдвигом  $30^\circ$  подключаются к двум АВН. Единая магнитная система трансформатора, в которой из-за смещения гармонических составляющих образуются дополнительные потери в магнитопроводящей стали, является существенным недостатком данной схемы по сравнению со схемой на **рис. 4**. Другой вариант 12-пульсной схемы на **рис. 5, б** выполнен на основе параллельного соединения двух однообмоточных трансформаторов, вторичные обмотки которых подключаются к двум АВН. Данная схема имеет другой существенный недостаток по сравнению с предыдущими – это более высокие стоимостные и массогабаритные показатели трансформаторов.

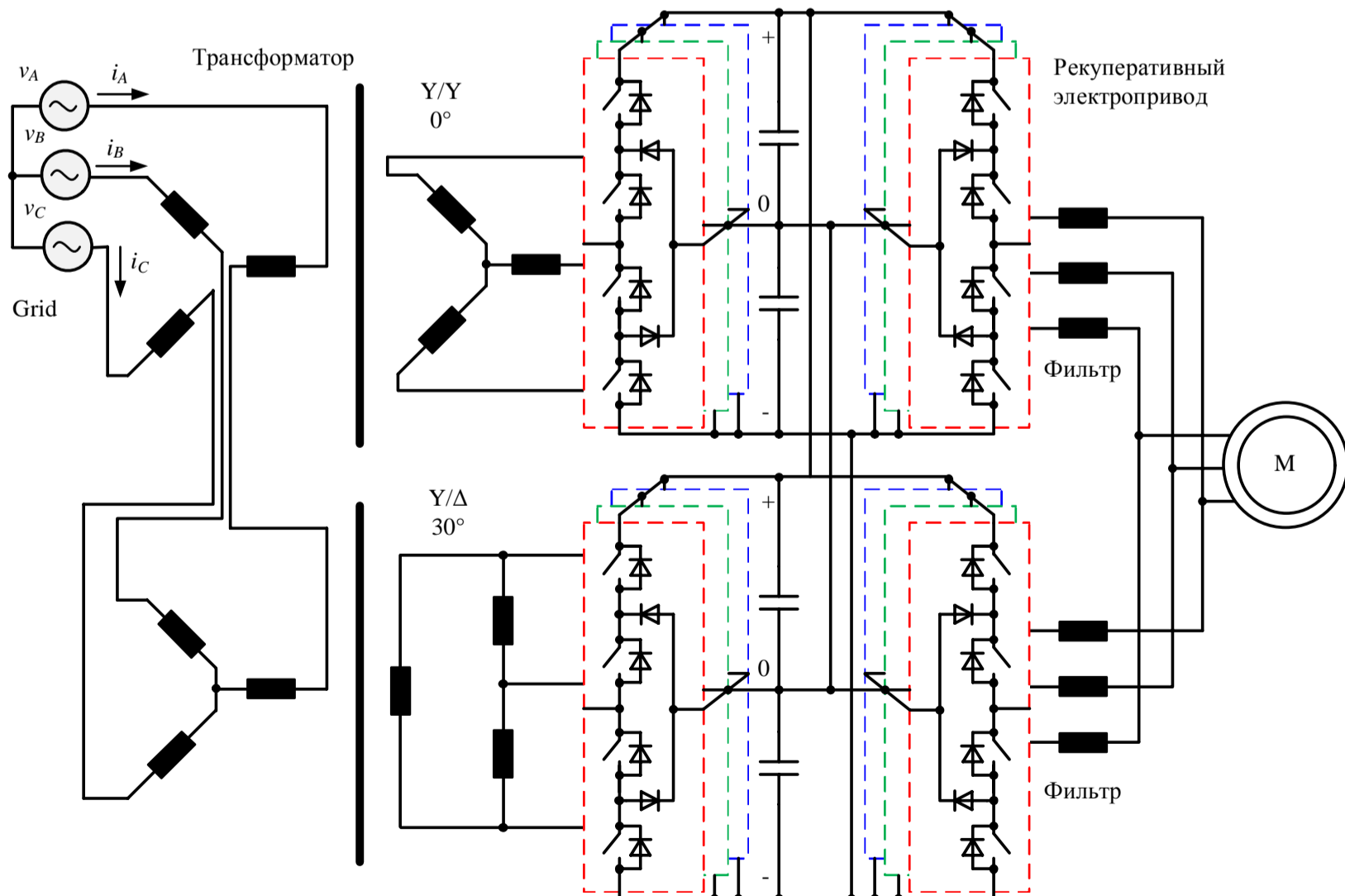


Рис. 4. 12-пульсная схема подключения на основе фазосдвигающего трансформатора с последовательным соединением первичных обмоток

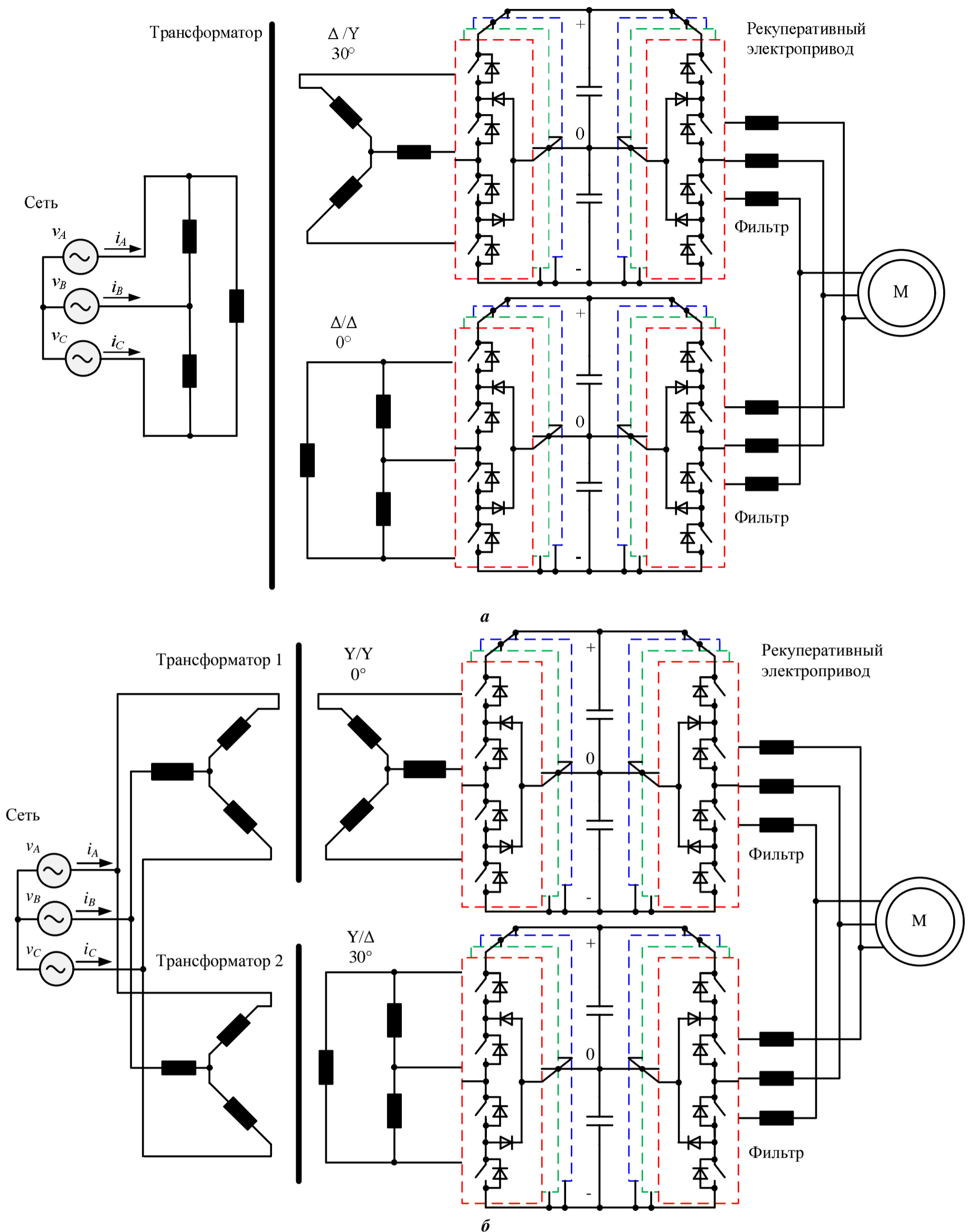


Рис. 5. 12-пульсные схемы на основе многообмоточного фазосдвигающего трансформатора (а) и параллельного соединения двух однообмоточных трансформаторов (б)

Последним популярным вариантом является 18-пульсная схема подключения. На рис. 6 она показана на примере главного электропривода прокатной клетки толстолистного стана горячей прокатки 5000. 18-пульсная схема построена на основе параллельного соединения трёх трансформаторов со сдвигами вторичных напряжений на 0, 20 и -20°, что позволяет по-

давить все коэффициенты гармонических составляющих тока, кроме  $18n \pm 1$  [42–46]. Следовательно, 18-пульсные схемы обладают лучшим качеством потребляемого сетевого тока, чем 6- и 12-пульсные. Вторичные обмотки трансформаторов 18-пульсной схемы подключаются к трём АВН, работающим с ПЗШИМ на частоте 250 Гц.

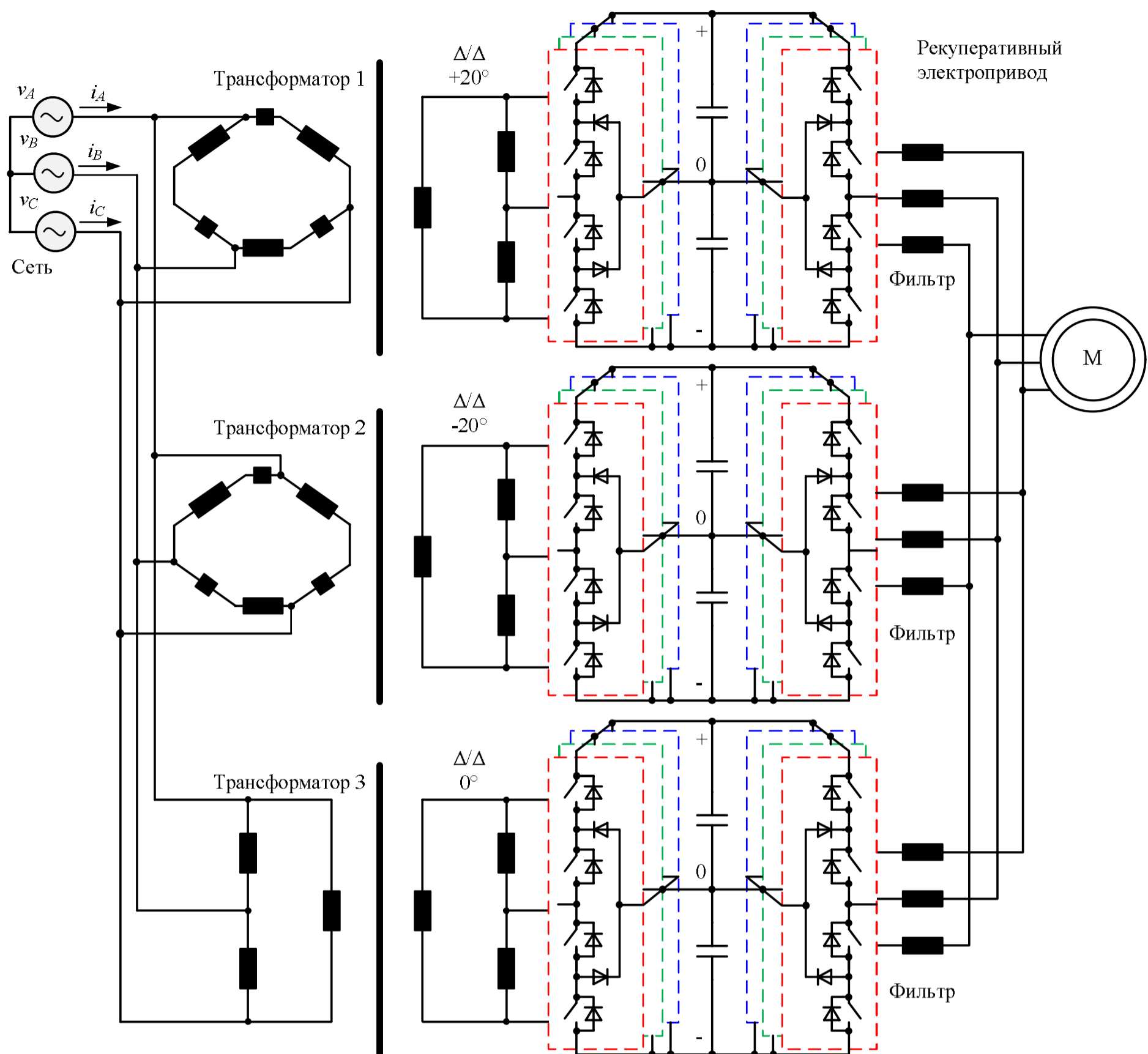


Рис. 6. 18-пульсная схема подключения к питающей сети на основе параллельного соединения трёх трансформаторов

Сдвиг векторов первичного напряжения относительно векторов вторичного напряжения первых гармоник на  $\pm 20^\circ$  получается путем соединения первичных обмоток трансформаторов многоугольниками с разделением на две секции и электрическом соединении этих секций таким образом, чтобы созданные дополнительные магнитные потоки фаз были направлены встречно.

Соотношение между секциями первичной обмотки получается следующее: на большую часть приходится 65%, а на меньшую – 35% от общего количества витков. Полное подавление гармоник в 18-пульсной схеме возможно только при сбалансированной нагрузке трёх АВН. По сравнению с 6- и 12-пульсными схемами требования к дополнительной фильтрации снижаются ещё больше. Основные технические характеристики схемы на рис. 6 представлены в таблице, а к её особенностям можно отнести следующее: 1) независимые магнитные системы трёх трансформаторов позволяют снизить потери в магнитопроводах; 2) электропривод может временно про-

должить работу на двух из трёх АВН.

На рис. 7 показана 18-пульсная схема подключения главных электроприводов прокатных клетей стана холодной прокатки 2000. Основные технические характеристики схемы подключения представлены в таблице. Данная 18-пульсная схема построена на основе одного многообмоточного фазосдвигающего трансформатора с последовательным соединением первичных обмоток. Сдвиг вторичных напряжений трансформатора на  $\pm 20^\circ$  образуется с помощью соединения вторичных обмоток трансформатора зигзагом. Из особенностей схемы на рис. 7 можно отметить следующее: 1) звено постоянного тока объединено и используется для питания сразу четырёх электроприводов посредством подключения к нескольким инверторам напряжения, обеспечивая при этом эффект 18-пульсной схемы для питания каждого двигателя; 2) последовательное соединение первичных обмоток фазосдвигающего трансформатора позволяет разделить между ними поровну напряжение сети.

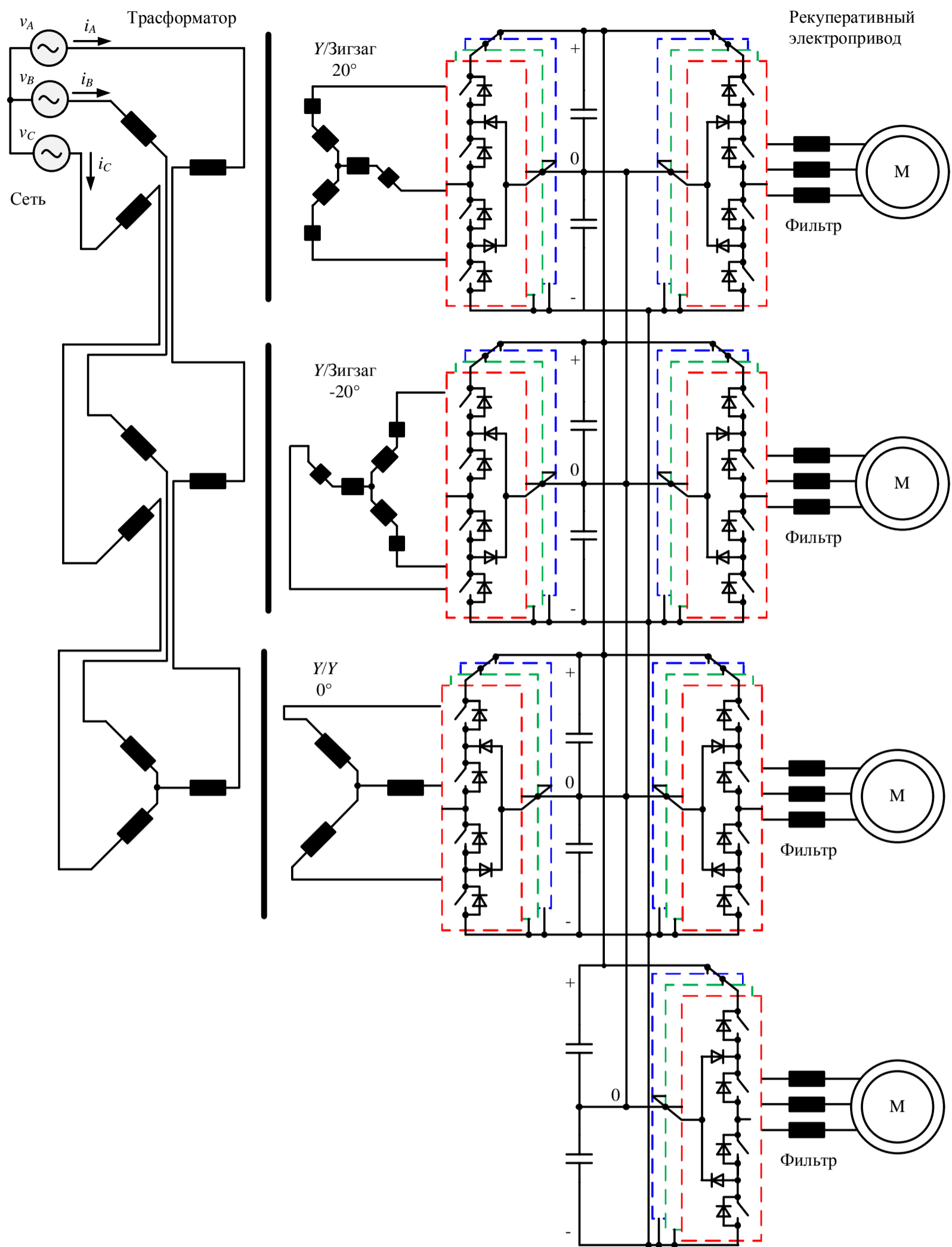


Рис. 7. 18-пульсная схема подключения к питающей сети главного электропривода клетки стана 2000 холодной прокатки на основе одного фазосдвигающего трансформатора с последовательным соединением первичных обмоток

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ  
НА ДЕЙСТВУЮЩЕМ ОБОРУДОВАНИИ

Результаты экспериментальных исследований получены в распределительной сети металлургического комбината ЧерМК «Северсталь», имеющей в своём составе мощные электроприводы клеток №1 и 2 стана холодной прокатки на базе преобразователей частоты с активными выпрямителями.

Оба преобразователя частоты электроприводов клеток №1 и 2 имеют одинаковую мощность – 14 МВт. Преобразователь частоты электропривода клетки №1 реализован по 6-пульсной схеме, а клетки №2 – 12-

пульсной. Запись мгновенных значений фазного тока трансформаторов, питающих электроприводы стана, осуществлялась с помощью портативного регистратора Flash Recorder и токовых клещей Fluke 43B. Частота дискретизации записываемых сигналов при этом составила 30 кГц.

На рис. 8 и 9 приведены мгновенные значения фазных токов, потребляемых из сети при подключении по 6- и 12-пульсной схемам, а также их спектры с указанием значений THD, рассчитанных для частотного диапазона от 0 до 3000 Гц (до 60-й гармоники).

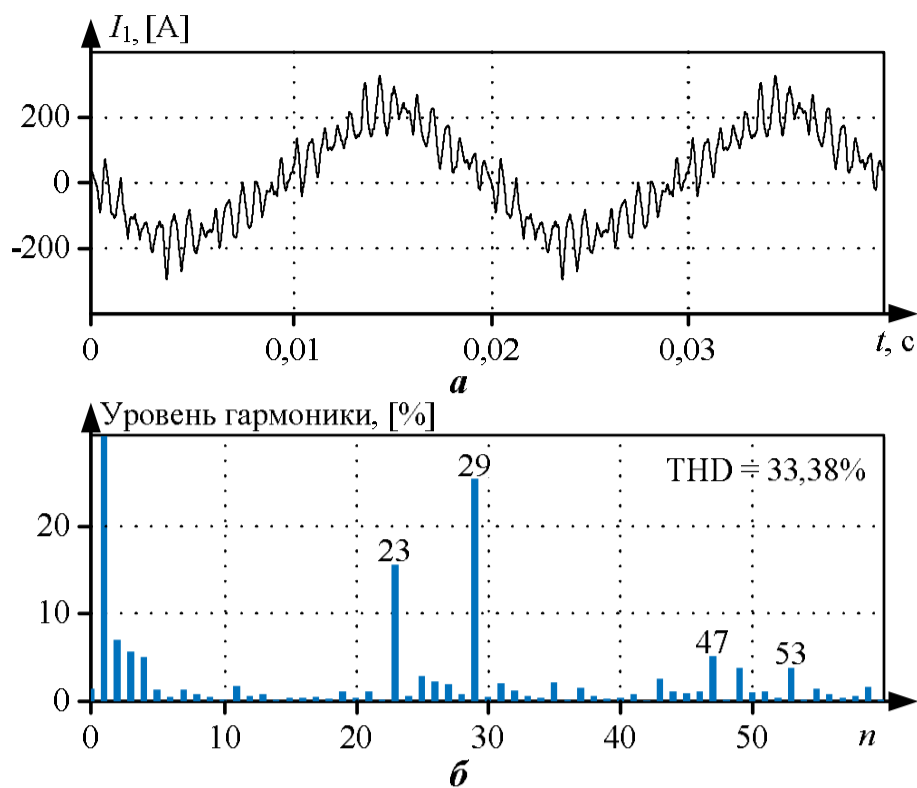


Рис. 8. Экспериментальные измерения фазного тока и его спектра в 6-пульсной схеме подключения к сети при ПЗШИМ с УВГ при удалении 5, 7, 11, 13, 17 и 19-й гармоник

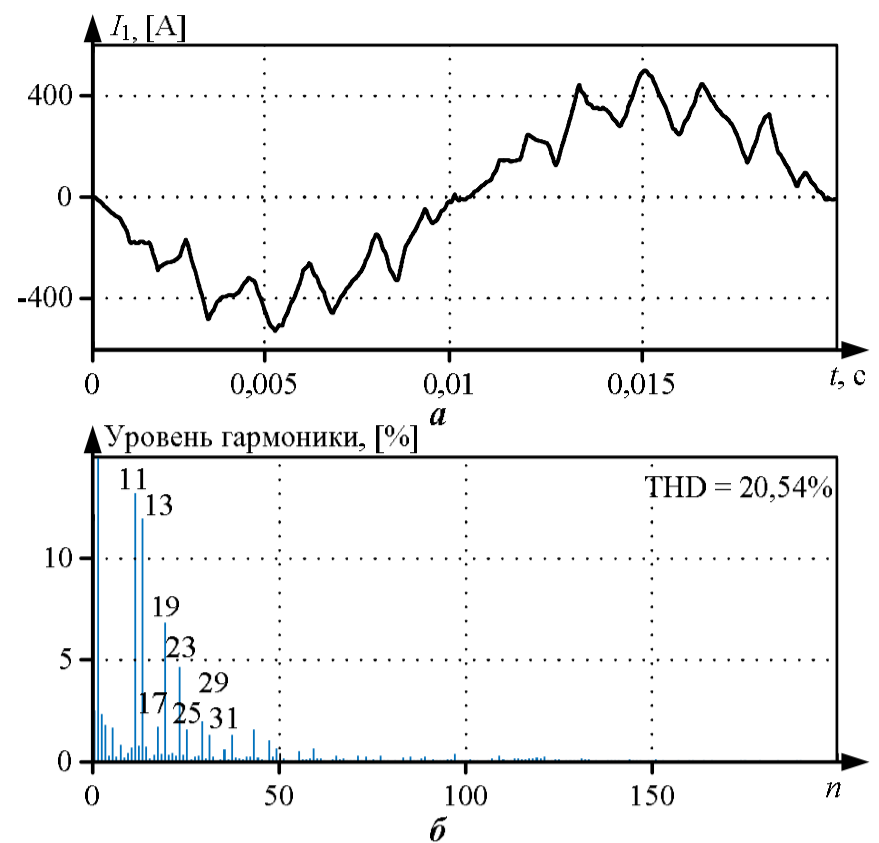


Рис. 10. Экспериментальные измерения фазного тока и его спектра в 6-пульсной схеме подключения к сети при ПЗШИМ с УВГ при удалении 5-й, 7-й гармоник

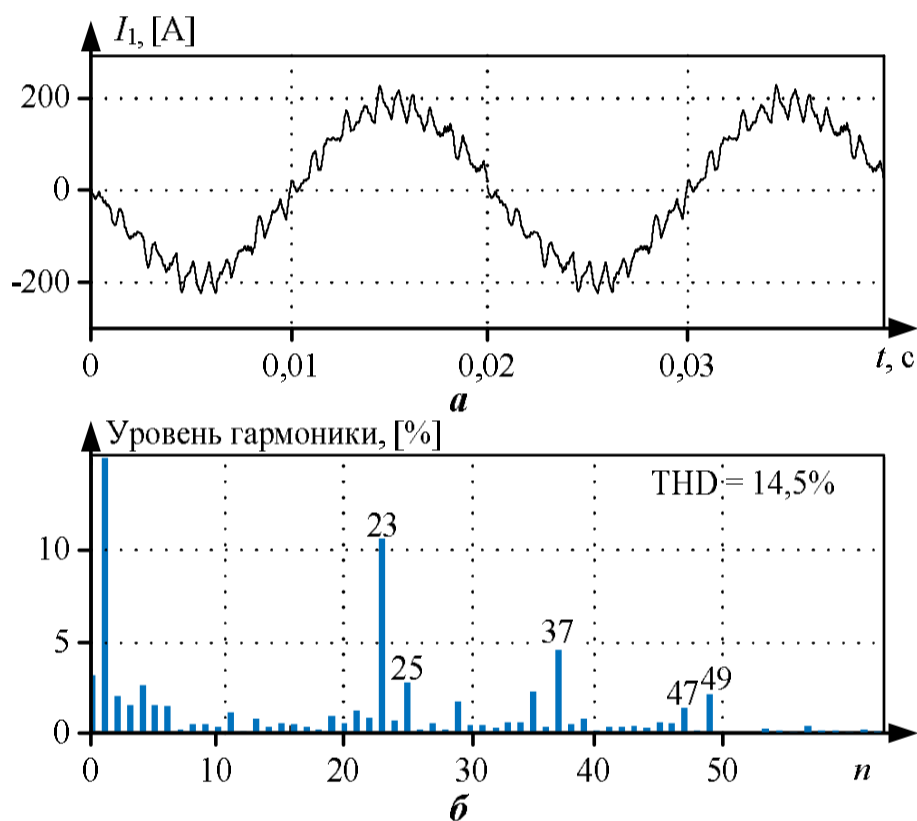


Рис. 9. Экспериментальные измерения фазного тока и его спектра в 12-пульсной схеме подключения к сети при ПЗШИМ с УВГ при удалении 5, 7, 11 и 13-й гармоник

На рис. 8 можно увидеть, что значение измеренного THD тока сети в 6-пульсной схеме при ПЗШИМ с УВГ при удалении 5, 7, 11, 13, 17 и 19-й гармоник составляет 33,38%, что почти в три раза хуже, чем в 12-пульсной схеме при удалении 5, 7, 11 и 13-й гармоник, как показано на рис. 9 (14,5%).

На рис. 10 и 11 представлены осциллограммы фазных токов, потребляемых электроприводами в более нагруженном режиме. Частота коммутации силовых ключей в первом случае при 6-пульсной схеме составляет всего 150 Гц, удалению подлежат 5-я и 7-я гармоники. В гармоническом спектре потребляемого тока присутствуют значимые гармоники с номерами 11, 13, 17, 19, 23, 25, 29, 31 (см. рис. 10).

Величина THD составила 20,54 % при величине первой гармоники тока в 396,5 А.

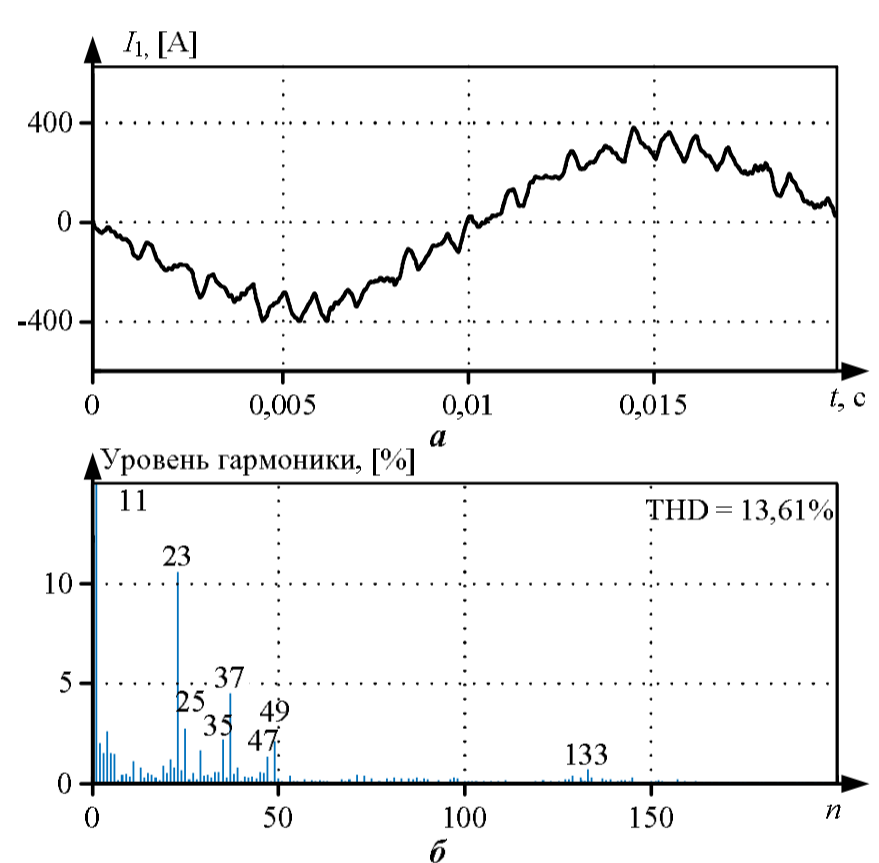


Рис. 11. Экспериментальные измерения фазного тока и его спектра в 12-пульсной схеме подключения к сети при ПЗШИМ с УВГ при удалении 5, 7, 11, 13, 17, 19-й гармоник

Во втором случае для 12-пульсной схемы из-за меньшей величины тока IГСТ-тиристоров их допустимая частота коммутации с учётом теплового баланса выше и составила 350 Гц. Применяется ПЗШИМ с УВГ при удалении 5, 7, 11, 13, 17, 19-й гармоник. Величина THD достигла 13,61% при величине первой гармоники тока в 322,2 А (см. рис. 11). В гармоническом спектре потребляемого тока на значимом уровне присутствуют 23, 25, 35, 37, 47, 49-я гармоники.

Соответственно, в состав преобразователя частоты электропривода клетки №2 включены два активных выпрямителя и ток, протекающий через IГСТ-тиристоры, в их плечах в два раза ниже, чем ток активного выпрямителя преобразователя частоты электропривода клетки №1 при одинаковой нагрузке. В обоих случаях в активных выпрямителях применяется ПЗШИМ с УВГ.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье приводится обзор наиболее часто используемых схем подключения к питающей сети главных РЭП ПТ клетей прокатных станков. Представлены их достоинства и недостатки, основные компоненты и их характеристики, алгоритмы ПЗШИМ с УВГ трёхуровневых АВН. Было показано, что при построении рассматриваемых силовых схем следует обязательно брать во внимание топологии преобразователей и алгоритмы ПЗШИМ с УВГ.

Наглядно показаны результаты сравнения 6-, 12-пульсных схем подключения мощных РЭП ПТ с алгоритмами ПЗШИМ с УВГ трёхуровневых АВН. Результаты могут быть использованы для оптимального выбора схемы подключения и алгоритма.

Представленные результаты могут быть использованы исследователями и инженерами для проектирования или проведения идентичных исследований в других схемах для обеспечения электромагнитной совместимости нелинейных потребителей.

**Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-29-20070), <https://rscf.ru/project/22-29-20070/>.**

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Recent advances and industrial applications of multilevel converters / S. Kouro, M. Malinowski, K. Gopakumar, J. Pou, L.G. Franquelo, B. Wu, J. Rodriguez, M.A. Pérez, J.I. Leon // *Ind. Electron. IEEE Trans.* 2010. Vol. 57. Pp. 2553-2580. doi: 10.1109/TIE.2010.2049719
2. Medium-voltage drives: challenges and existing technology / H. Abu-Rub, S. Bayhan, S. Moinoddin, M. Malinowski, J. Guzinski // *IEEE Power Electron. Mag.* 2016. Vol. 3. Pp. 29-41. doi: 10.1109/MPEL.2016.2551802
3. Design and control of digital DC drives in steel rolling mills / D. Rajesh, D. Ravikumar, S.K. Bharadwaj, B.K.S. Vastav // 2016 International Conference on Inventive Computation Technologies (ICICT), 2016. Pp. 1-5. doi: 10.1109/INVENTIVE.2016.7830095
4. Medium voltage drives-challenges and requirements / H. Abu-Rub, A. Lewicki, A. Iqbal, J. Guzinski // 2010 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2010. Pp. 1372-1377. doi: 10.1109/ISIE.2010.5637205
5. IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems. IEEE Std. 519-1992, 1993. Pp. 1-112. doi: 10.1109/IEEESTD.1993.114370.
6. IEEE Guide for Application and Specification of Harmonic Filters. IEEE Std. 1531-2003, 2003. Pp. 1-66. doi: 10.1109/IEEESTD.2003.94407
7. Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems. Std. EN 50160, 2001.
8. Power Quality Measurement Methods. IEC 61000-3-2, 2000.
9. Powering the future of industry: high-power adjustable speed drive topologies / S. Kouro, J. Rodriguez, B. Wu, S. Bernet, M. Perez // *IEEE Ind. Appl. Mag.*, 2012. № 18. Pp. 26-39. doi: 10.1109/MIAS.2012.2192231
10. Jing T., Maklakov A.S. A review of voltage source converters for energy applications // 2018 International Ural Conference on Green Energy (UralCon). Chelyabinsk, Russia, 2018. Pp. 275-281. doi: 10.1109/URALCON.2018.8544364.
11. Bose B.K. *Modern Power Electronics and AC Drives*. Prentice Hall PTR: Hoboken, NJ, USA, 2002. 736 p.
12. Multilevel converters: An enabling technology for high-power applications / J. Rodriguez, L.G. Franquelo, S. Kouro, J.I. Leon, R.C. Portillo, M.A.M. Prats, M.A. Perez // *Proc. IEEE*. 2009. № 97. Pp. 1786-1817. doi: 10.1109/JPROC.2009.2030235
13. Wang L. *Modeling and Control of Sustainable Power Systems: Towards Smarter and Greener Electric Grids*. Springer: Hoboken, NJ, USA, 2012. 367 p. doi: 10.1007/978-3-642-22904-6
14. Моделирование электротехнических комплексов металлургических предприятий: учебное пособие / Корнилов Г.П., Николаев А.А., Храмшин Т.Р., Мурзинов А.А. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2012. 237 с.
15. Multilevel inverters: a literature survey on topologies and control strategies / N. Mittal, B. Singh, S.P. Singh, R. Dixit, D. Kumar // 2012 2nd International Conference on Power, Control and Embedded Systems. Allahabad, India, 2012. Pp. 1-11. doi: 10.1109/ICPCES.2012.6508041
16. Multilevel voltage-source-converter for industrial medium-voltage drives / J. Rodriguez, S. Bernet, B. Wu, J.O. Pontt, S. Kouro // *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2007. Vol. 54. Pp. 2930-2945. doi: 10.1109/TIE.2007.907044.
17. The age of multilevel converters arrives / L.G. Franquelo, J. Rodriguez, J.I. Leon, S. Kouro, R. Portillo, M.A.M. Prats // *IEEE Ind. Electron. Mag.* 2008. № 2. Pp. 28-39. doi: 10.1109/MIE.2008.923519
18. An effective control technique for medium-voltage high-power induction motor fed by cascaded neutral-point-clamped inverter / B. Ge, F.Z. Peng, B. Wu, A.T. de Almeida, H. Abu-Rub // *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2010. № 57. Pp. 2659-2668. doi: 10.1109/TIE.2009.2026761
19. Ewanchuk J., Salmon J., Vafakhah, B. A five-/nine-level twelve-switch neutral-point-clamped inverter for high-speed electric drives // *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2011. Vol. 47(5). Pp. 2145-2153. doi: 10.1109/TIA.2011.2161857
20. Bernet S. State of the art and developments of medium voltage converters – An overview // *Prz. Elektrotechniczny*. 2006. Vol. 82. Pp. 1-10.
21. Mohammed S.A., Abdel-Moamen M.A., Hasanin B. A review of the state-of-the-art of power electronics for power system applications // *Int. J. Electron. Commun. Eng. Res.* 2013. Vol. 1. Pp. 43-52.
22. Fazel S.S. Investigation and comparison of multi-level converters for medium voltage applications: doctoral thesis / Fazel Seyed Saeed. Berlin, 2007. doi: 10.14279/depositonce-1678
23. Nabae A., Takahashi I., Akagi H. New neutral-point-clamped PWM inverter // *IEEE Trans. Ind. Appl.* 1981. Vol. IA-17. Pp. 518-523.
24. Leon J.I., Vazquez S., Franquelo L.G. Multilevel converters: Control and modulation techniques for their operation and industrial applications // *Proc. IEEE*. 2017. Vol. 105. Pp. 2066-2081. doi: 10.1109/JPROC.2017.2726583
25. Medium-voltage multilevel converters – State of the art, challenges, and requirements in industrial applications / H. Abu-Rub, J. Holtz, J. Rodriguez, B. Ge // *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2010. Vol. 57(8). Pp. 2581-2596. doi: 10.1109/TIE.2010.2043039
26. Wu B., Narimani M. *High-power converters and AC drives*. Wiley-IEEE Press: Hoboken, NJ, USA, 2017. 480 p.
27. Multipulse AC-DC converters for improving power quality: a review / B. Singh, S. Gairola, B.N. Singh, A. Chandra, K. Al-Haddad // *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2008. Vol. 23(1). Pp. 260-281. doi: 10.1109/TPEL.2007.911880
28. Evaluation on the autoconfigured multipulse AC/DC rectifiers and their application in more electric aircrafts / J. Chen, Y. Shen, J. Chen, H. Bai, C. Gong and F. Wang // *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. 2020. Vol. 6(4). Pp. 1721-1739. doi: 10.1109/TTE.2020.2983858
29. Nikolaev A.A., Bulanov M.V., Shakhbieva K.A. Quality improvement of electric power in the intra-factory electric networks through the use of PWM algorithm selective harmonic mitigation // 2020 Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI). Magnitogorsk, 2020. Pp. 26-31. doi: 10.1109/PEAMI49900.2020.9234357

30. Large capacity high performance 3-level GTO inverter system for steel main rolling mill drives / H. Okayama, R. Uchida, M. Koyama, S. Mizoguchi, S. Tamai // IAS '96. Conference Record of the 1996 IEEE Industry Applications Conference Thirty-First IAS Annual Meeting. 1996. Vol. 1. Pp. 174-179. doi: 10.1109/IAS.1996.557012
31. Design of high-reliable converters for medium-voltage rolling mills systems / V. de Nazareth Ferreira, A.F. Cupertino, H.A. Pereira, A.V. Rocha, S.I. Seleme, B. de Jesus Cardoso Filho // 2017 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. 2017. Pp. 1-9. doi: 10.1109/IAS.2017.8101826
32. Bocker J., Janning J., Jebenstreit H. High dynamic control of a three-level voltage-source-converter drive for a main strip mill // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2002. Vol. 49(5). Pp. 1081-1092. doi: 10.1109/TIE.2002.803220
33. Safaeian M., Jalilvand A., Taheri A. A MRAS based model predictive control for multi-leg based multi-drive system used in hot rolling mill applications // IEEE Access. 2020. Vol. 8. Pp. 215493-215504. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3041310
34. Radionov A.A., Maklakov A.S., Gasiyarov V.R. Smart Grid for main electric drive of plate mill rolling stand // 2014 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS). 2014. Pp. 1-4. doi: 10.1109/MEACS.2014.6986842
35. Network-friendly low-switching-frequency multipulse high-power three-level PWM rectifier / J.A. Pontt, J.R. Rodriguez, A. Liendo, P. Newman, J. Holtz, J.M. San Martin // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2009. Vol. 56(4). Pp. 1254-1262. doi: 10.1109/TIE.2008.2007998
36. Maklakov A.S., Radionov A.A. Integration prospects of electric drives based on back to back converters in industrial smart grid // 2014 12th International Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE). 2014. Pp. 770-774. doi: 10.1109/APEIE.2014.7040790
37. Hardware-in-loop simulation and application for high-power AC-DC-AC rolling mill driving system / Y. Zhang, J. Tan, J. Wang, J. Li // 2015 IEEE 11th International Conference on Power Electronics and Drive Systems. 2015. Pp. 177-180. doi: 10.1109/PEDS.2015.7203385
38. A converter transformer with series-connected line-side windings for a DC link using voltage source converters / T. Nakajima, H. Suzuki, K. Izumi, S. Sugimoto, H. Yonezawa, Y. Tsubota // IEEE Power Engineering Society. 1999 Winter Meeting (Cat. No.99CH36233). 1999. Vol. 2. Pp. 1073-1078. doi: 10.1109/PESW.1999.747351
39. Kornilov G.P., Khramshin T.R., Abdulveleev I.R. Increasing stability of electric drives of rolling mills with active front ends at voltage sag // 2019 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS). 2019. Pp. 1-4. doi: 10.1109/ICOECS46375.2019.8949945
40. Design and selection of high reliability converters for mission critical industrial applications: a rolling mill case study / V. de Nazareth Ferreira, A. Fagner Cupertino, H. Augusto Pereira, A. Vagner Rocha, S. Isaac Seleme, B. de Jesus Cardoso Filho // IEEE Transactions on Industry Applications. 2018. Vol. 54(5). Pp. 4938-4947. doi: 10.1109/TIA.2018.2829104
41. Retrofit of a hot rolling mill plant with three-level active front end drives / G.A. Orcajo, J. Rodríguez D., J.M. Cano, J.G. Norniella // IEEE Transactions on Industry Applications. 2018. Vol. 54(3). Pp. 2964-2974. doi: 10.1109/TIA.2018.2808159
42. Multicell AFE rectifier managed by finite control set-model predictive control / E.E. Espinosa, P.E. Melin, H.O. Garcés, C.R. Baier, J.R. Espinoza // IEEE Access. 2021. Vol. 9. Pp. 137782-137792. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3116938
43. Study on large power converter system for rolling mills / W. Chengsheng, L. Chongjian, Z. Chunyi, L. Zhiming, Y. Qiongtao // 2012 15th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC). 2012. Pp. DS1b.20-1-DS1b.20-4. doi: 10.1109/EPEPEMC.2012.6397220
44. Finding the best programmable PWM pattern for three-level active front-ends at 18-pulse connection / A.S. Maklakov, T. Jing, A.A. Radionov, V.R. Gasiyarov, T.A. Lisovskaya // Machines. 2021. Vol. 9. 127. doi: 10.3390/machines9070127
45. Gasiyarov V.R., Maklakov A.S., Lisovski R.A. Grid power control by medium voltage AC drives based on back-to-back converters // 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). 2018. Pp. 629-631. doi: 10.1109/EIConRus.2018.8317175
46. A regenerative hexagonal-cascaded multilevel converter for two-motor asynchronous drive / P. Wang, F. Liu, X. Zha, J. Gong, F. Zhu, X. Xiong // IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics. 2017. Vol. 5(4). Pp. 1687-1699. doi: 10.1109/JESTPE.2017.2713043

Поступила в редакцию 1 сентября 2022 г.

Принята к печати 30 сентября 2022 г.

## INFORMATION IN ENGLISH

### GRID CONNECTION CIRCUITS FOR POWERFUL REGENERATIVE ELECTRIC DRIVES OF ROLLING STANDS

Alexander S. Maklakov

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Senior Researcher, Research and Innovation Services, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia, alexandr.maklakov.ru@ieee.org, <https://orcid.org/0000-0001-7950-708X>

Alexander A. Nikolaev

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

Andrey A. Radionov

D.Sc. (Engineering), Professor, Department of Automation and Control, Moscow Polytechnic University, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Moscow, Russia, radionov.mail@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3914-4429>

Vadim R. Gasiyarov

D.Sc. (Engineering), Associate Professor, Professor, Department of Automation and Control, Moscow Polytechnic University, Master's Degree Student, Automated Control Systems Department, Nosov Magnitogorsk State University, Moscow, gasiyarovvr@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9635-4716>

Ildar G. Gilemov

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

AC regenerative drives are widely used in metallurgical rolling because of their reliability, economy and high efficiency to maintain the process. This article presents an overview of the latest achievements in the field of power connection circuits for electric drives to the power network. The article discusses multipulse connection schemes based on various types of transformers, algorithms for pre-programmed pulse-width modulation with the selected harmonic elimination method of three-level active front-end rectifiers. It provides the results of practical measurements. The results of experimental studies were obtained in the distribution power network of the metallurgical plant CherMK "Sever-Stal", which includes powerful electric drives for cold rolling mill stands based on frequency converters with active front-end rectifiers. Both frequency converters have the same power - 14 MW. One frequency converter is implemented according to a 6-pulse scheme, and the other according to a 12-pulse one. The instantaneous values of the phase current of the current transformers were recorded using a portable Flash Recorder and a Fluke 43B current clamp. The sampling frequency of the recorded signals was 30 kHz. The phase grid current waveforms and spectrums at 6- and 12-pulse circuits are shown and the total harmonic distortion up to the 60th and 150th harmonics are calculated for different pre-programmed pulse-width modulation patterns. It is expected that this article can give a new overview of the multipulse schemes for main regenerative AC drive connections of rolling mill stands to identify modern solutions and to improve significantly their electromagnetic compatibility with the power supply system. The presented results can be used by researchers and engineers to ensure the electromagnetic compatibility of non-linear consumers in similar circuits.

**Keywords:** power converters, electric drive, pulse-width modulation, voltage quality, multipulse connection schemes

#### REFERENCES

1. Kouro S., Malinowski M., Gopakumar K., Pou J., Franquelo L.G., Wu B., Rodriguez J., Pérez M.A., Leon J.I. Recent Advances and Industrial Applications of Multilevel Converters. *Ind. Electron. IEEE Trans.* 2010, vol. 57, pp. 2553–2580. doi: 10.1109/TIE.2010.2049719.
2. Abu-Rub H., Bayhan S., Moinoddin S., Malinowski M., Guzinski J. Medium-Voltage Drives: Challenges and existing technology. *IEEE Power Electron. Mag.* 2016, vol. 3, pp. 29–41. doi: 10.1109/MPPEL.2016.2551802
3. Rajesh D., Ravikumar D., Bharadwaj S.K., Vastav B.K.S. Design and control of digital DC drives in steel rolling mills. 2016 International Conference on Inventive Computation Technologies (ICICT). IEEE, 2016, pp. 1–5. doi: 10.1109/INVENTIVE.2016.7830095
4. Abu-Rub H., Lewicki A., Iqbal A., Guzinski J. Medium Voltage Drives-Challenges and Requirements. In *Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics*. IEEE, 2010, pp. 1372–1377. doi: 10.1109/ISIE.2010.5637205
5. IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems. *IEEE Std 519-1992, 1993*, pp. 1–112. doi: 10.1109/IEEESTD.1993.114370
6. IEEE Guide for Application and Specification of Harmonic Filters. *IEEE Std. 1531-2003, 2003*, pp. 1–66. doi: 10.1109/IEEESTD.2003.94407
7. Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems. *Std. EN 50160, 2001*.
8. Power Quality Measurement Methods. *IEC 61000-3-2, 2000*.
9. Kouro S., Rodriguez J., Wu B., Bernet S., Perez M. Powering the Future of Industry: High-Power Adjustable Speed Drive Topologies. *IEEE Ind. Appl. Mag.* 2012, no. 8, pp. 26–39. doi: 10.1109/MIAS.2012.2192231
10. Jing T., Maklakov A.S. A Review of Voltage Source Converters for Energy Applications. In *Proceedings of the International Ural Conference on Green Energy*. IEEE, 2018, pp. 275–281. doi: 10.1109/URALCON.2018.8544364
11. Bose B.K. *Modern Power Electronics and AC Drives*, 1<sup>st</sup> ed. Prentice Hall PTR, Hoboken, NJ, USA, 2002. 736 p.
12. Rodriguez J., Franquelo L.G., Kouro S., Leon J.I., Portillo R.C., Prats M.A.M., Perez M.A. Multilevel converters: An enabling technology for high-power applications. *Proc. IEEE* 2009, no. 97, pp. 1786–1817. doi: 10.1109/JPROC.2009.2030235
13. Wang L. *Modeling and Control of Sustainable Power Systems: Towards Smarter and Greener Electric Grids*, 1<sup>st</sup> ed. Springer, Hoboken, NJ, USA, 2012. 367 p. doi: 10.1007/978-3-642-22904-6
14. Kornilov G.P., Nikolaev A.A., Khrumshin T.R. *Modelirovanie elektrotekhnicheskikh kompleksov metallurgicheskikh predpriyatij [Mathematical Modeling of the Metallurgical Plants' Electrotechnical Complexes]*. Magnitogorsk, Nosov Magnitogorsk State Technical University Publ., 2012. 237 p. (In Russian)
15. Mittal N., Singh B., Singh S.P., Dixit R., Kumar D. Multi-level Inverters: A Literature Survey on Topologies and Control Strategies. 2<sup>nd</sup> International Conference on Power, Control and Embedded Systems. IEEE, 2012, pp. 1–11. doi: 10.1109/ICPCES.2012.6508041
16. Rodriguez J., Bernet S., Wu B., Pontt J.O., Kouro S. Multi-level voltage-source-converter for industrial medium-voltage drives. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2007, vol. 54, pp. 2930–2945. doi: 10.1109/TIE.2007.907044
17. Franquelo L.G., Rodriguez J., Leon J.I., Kouro S., Portillo R., Prats M.A.M. The age of multilevel converters arrives. *IEEE Ind. Electron. Mag.* 2008, no. 2, pp. 28–39. doi: 10.1109/MIE.2008.923519
18. Ge B., Peng F.Z., Wu B., de Almeida A.T., Abu-Rub H. An effective control technique for medium-voltage high-power induction motor fed by cascaded neutral-point-clamped inverter. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2010, no. 57, pp. 2659–2668. doi: 10.1109/TIE.2009.2026
19. Ewanchuk J., Salmon J., Vafakhah B. A five-/nine-level twelve-switch neutral-point-clamped inverter for high-speed electric drives. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2011, vol. 47, pp. 2145–2153. doi: 10.1109/TIA.2011.2161857
20. Bernet S. State of the art and developments of medium voltage converters—An overview. *Prz. Elektrotechniczny*. 2006, vol. 82, pp. 1–10.
21. Mohammed S.A., Abdel-Moamen M.A., Hasanin B. A review of the state-of-the-art of power electronics for power system applications. *Int. J. Electron. Commun. Eng. Res.* 2013, vol. 1, pp. 43–52.
22. Fazel S.S. *Investigation and Comparison of Multi-Level Converters for Medium Voltage Applications*. 2017. Thesis. Technische Universität Berlin.
23. Nabae A., Takahashi I., Akagi H. New neutral-point-clamped PWM inverter. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 1981, vol. IA–17, pp. 518–523.
24. Leon J.I., Vazquez S., Franquelo L.G. Multilevel converters: Control and modulation techniques for their operation and industrial applications. *Proc. IEEE*. 2017, vol. 105, pp. 2066–2081. doi: 10.1109/JPROC.2017.2726583
25. Abu-Rub H., Holtz J., Rodriguez J., Ge B. Medium-voltage multilevel converters – State of the art, challenges, and requirements in industrial applications. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2010, vol. 57(8), pp. 2581–2596. doi: 10.1109/TIE.2010.2043039

26. Wu B., Narimani M. High-Power Converters and AC Drives, 2<sup>nd</sup> ed. Wiley-IEEE Press, Hoboken, NJ, USA, 2017. 480 p.
27. Singh B., Gairola S., Singh B.N., Chandra A., Al-Haddad K. Multipulse AC-DC Converters for Improving Power Quality: A Review. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2008, vol. 23, no. 1, pp. 260-281. doi: 10.1109/TPEL.2007.911880
28. Chen J., Shen Y., Chen J., Bai H., Gong C., Wang F., Evaluation on the Autoconfigured Multipulse AC/DC Rectifiers and Their Application in More Electric Aircrafts. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*. 2020, vol. 6, no. 4, pp. 1721-1739. doi: 10.1109/TTE.2020.2983858
29. Nikolaev A.A., Bulanov M.V., Shakhbieva K.A. Quality Improvement of Electric Power in the Intra-factory Electric Networks through the Use of PWM Algorithm Selective Harmonic Mitigation. 2020 Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI). IEEE, 2020, pp. 26-31. doi: 10.1109/PEAMI49900.2020.9234357
30. Okayama H., Uchida R., Koyama M., Mizoguchi S., Tamai S. Large capacity high performance 3-level GTO inverter system for steel main rolling mill drives. IAS '96. Conference Record of the 1996 IEEE Industry Applications Conference Thirty-First IAS Annual Meeting. IEEE, 1996, vol. 1, pp. 174-179. doi: 10.1109/IAS.1996.557012
31. de Nazareth Ferreira V., Cupertino A.F., Pereira H.A., Rocha A.V., Isaac Seleme S., de Jesus Cardoso Filho B. Design of high-reliable converters for medium-voltage rolling mills systems. 2017 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. IEEE, 2017, pp. 1-9. doi: 10.1109/IAS.2017.8101826
32. Bocker J., Janning J., Jebenstreit H. High dynamic control of a three-level voltage-source-converter drive for a main strip mill. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2002, vol. 49, no. 5, pp. 1081-1092. doi: 10.1109/TIE.2002.803220
33. Safaeian M., Jalilvand A., Taheri A.A. MRAS based model predictive control for multi-leg based multi-drive system used in hot rolling mill applications. *IEEE Access*. 2020, vol. 8, pp. 215493-215504. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3041310
34. Radionov A.A., Maklakov A.S., Gasiyarov V.R. Smart Grid for main electric drive of plate mill rolling stand. 2014 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS). IEEE, 2014, pp. 1-4. doi: 10.1109/MEACS.2014.6986842
35. Pontt J.A., Rodriguez J.R., Liendo A., Newman P., Holtz J., San Martin J.M. Network-Friendly Low-Switching-Frequency Multipulse High-Power Three-Level PWM Rectifier. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2009, vol. 56, no. 4, pp. 1254-1262. doi: 10.1109/TIE.2008.2007998
36. Maklakov A.S., Radionov A.A. Integration prospects of electric drives based on back to back converters in industrial smart grid. 2014 12<sup>th</sup> International Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE). IEEE, 2014, pp. 770-774. doi: 10.1109/APEIE.2014.7040790
37. Zhang Y., Tan J., Wang J., Li J. Hardware-in-loop simulation and application for high-power AC-DC-AC rolling mill driving system. 2015 IEEE 11th International Conference on Power Electronics and Drive Systems. IEEE, 2015, pp. 177-180. doi: 10.1109/PEDS.2015.7203385
38. Nakajima T., Suzuki H., Izumi K., Sugimoto S., Yonezawa H., Tsubota Y. A converter transformer with series-connected line-side windings for a DC link using voltage source converters. *IEEE Power Engineering Society. 1999 Winter Meeting (Cat. No.99CH36233)*. 1999, vol. 2, pp. 1073-1078. doi: 10.1109/PESW.1999.747351
39. Kornilov G.P., Khramshin T.R., Abdulveleev I.R. Increasing stability of electric drives of rolling mills with active front ends at voltage sag. 2019 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS). IEEE, 2019, pp. 1-4. doi: 10.1109/ICOECS46375.2019.8949945
40. de Nazareth Ferreira V., Fagner Cupertino A., Augusto Pereira H., Vagner Rocha A., Isaac Seleme S., de Jesus Cardoso Filho B. Design and Selection of High Reliability Converters for Mission Critical Industrial Applications: A Rolling Mill Case Study. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2018, vol. 54 (5), pp. 4938-4947. doi: 10.1109/TIA.2018.2829104
41. Orcajo G.A., D. Rodríguez J., Cano J.M., Norniella J.G. Retrofit of a Hot Rolling Mill Plant With Three-Level Active Front End Drives. *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 54(3), pp. 2964-2974. doi: 10.1109/TIA.2018.2808159
42. Espinosa E.E., Melin P.E., Garcés H.O., Baier C.R., Espinoza J.R. Multicell AFE Rectifier Managed by Finite Control Set-Model Predictive Control. *IEEE Access*. 2021, vol. 9, pp. 137782-137792. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3116938
43. Chengsheng W., Chongjian L., Chunyi Z., Zhiming L., Qiongtao Y. Study on large power converter system for rolling mills. 2012 15th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC). IEEE, 2012, pp. DS1b.20-1-DS1b.20-4. doi: 10.1109/EPEPEMC.2012.6397220
44. Maklakov A.S., Jing T., Radionov A.A., Gasiyarov V.R., Lisovskaya T.A. Finding the Best Programmable PWM Pattern for Three-Level Active Front-Ends at 18-Pulse Connection. *Machines*. 2021, vol. 9, 127. doi: 10.3390/machines9070127
45. Gasiyarov V.R., Maklakov A.S., Lisovski R.A. Grid power control by medium voltage AC drives based on back-to-back converters. 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). IEEE, 2018, pp. 629-631. doi: 10.1109/EIConRus.2018.8317175
46. Wang P., Liu F., Zha X., Gong J., Zhu F., Xiong X. A Regenerative Hexagonal-Cascaded Multilevel Converter for Two-Motor Asynchronous Drive. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*. 2017, vol. 5(4), pp. 1687-1699. doi: 10.1109/JESTPE.2017.2713043

Схемы подключения к сети мощных рекуперативных электроприводов клеток прокатных станков / А.С. Маклаков, А.А. Николаев, А.А. Радионов, В.Р. Гасияров, Гилемов И.Г. // *Электротехнические системы и комплексы*. 2022. № 4(57). С. 42-53. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-4\(57\)-42-53](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-4(57)-42-53)

Maklakov A.S., Nikolaev A.A., Radionov A.A., Gasiyarov V.R., Gilemov I.G. Grid Connection Circuits for Powerful Regenerative Electric Drives of Rolling Stands. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2022, no. 4(57), pp. 42-53. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-4\(57\)-42-53](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-4(57)-42-53)