

Николаев А.А., Гилемов И.Г., Линьков С.А., Светлаков М.С.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СЕТИ 34,5 кВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ЗАВОДА ЗАО «ММК METALURJI»

В системах внутриводского электроснабжения металлургических заводов используются распределительные сети среднего напряжения 6–35 кВ. В результате взаимного влияния ёмкостей протяжённых кабельных линий и индуктивностей понижающих трансформаторов возможно возникновение резонансных явлений в диапазоне средних частот. В случае попадания высокочастотных гармоник, генерируемых преобразователями частоты с активными выпрямителями, в резонансную область возможны аварийные режимы работы потребителей во внутриводской распределительной сети предприятия. Подобные явления могут приводить к длительным простоям технологического оборудования, браку продукции. Это влечёт за собой значительный экономический ущерб, особенно при производстве продукции с высокой добавленной стоимостью. В данной работе были отражены результаты экспериментальных исследований качества напряжения в распределительной сети 34,5 кВ металлургического завода «ММК Metalurji». Целью экспериментальных исследований был анализ текущих режимов работы системы электроснабжения для разработки научно обоснованных технических мероприятий, направленных на улучшение качества напряжения в точке общего подключения внутриводских потребителей при основном режиме работы системы электроснабжения. При проведении экспериментальных исследований был применён анализатор качества электроэнергии Fluke 435 и токовых клещей Fluke i5s. Предложены мероприятия по улучшению электромагнитной совместимости преобразователей частоты с активными выпрямителями электроприводов стана горячей прокатки 1750 с питающей сетью.

Ключевые слова: внутриводская система электроснабжения, показатели качества электроэнергии, преобразователь частоты, активный выпрямитель, широтно-импульсная модуляция, электромагнитная совместимость, резонанс токов, частотная характеристика

ВВЕДЕНИЕ

Современный регулируемый электропривод (ЭП) переменного тока реализуется на базе преобразователей частоты (ПЧ). При значительной мощности ЭП часто применяются преобразователи частоты с активными выпрямителями (ПЧ-АВ) [1-10]. Благодаря применению АВ удаётся обеспечить работу ЭП с единичным коэффициентом мощности, а также при использовании специальных алгоритмов широтно-импульсной модуляции (ШИМ) улучшить электромагнитную совместимость (ЭМС) с питающей сетью.

Однако, несмотря на более высокие технические показатели по сравнению с диодными выпрямителями, АВ не лишены недостатков. При провалах питающего напряжения АВ показывают неустойчивую работу, часто приводящую к аварийным отключениям [7, 11-13]. В случае применения специальных алгоритмов ШИМ, например ШИМ с удалением выделенных гармоник (ШИМ с УВГ) [14-20], АВ генерируют высокочастотные гармоники значительной величины [8].

На некоторых металлургических предприятиях при эксплуатации ПЧ-АВ наблюдались проблемы с функционированием электрооборудования. Например, происходили выходы из строя ПЧ, функционирующих параллельно мощным ПЧ-АВ главных ЭП прокатного стана [1, 2], аварийные отключения ПЧ-АВ при провалах и несимметрии напряжения питающей сети [7], ухудшение качества напряжения во внутриводской распределительной сети [8].

В одной из предыдущих работ [8] была рассмотрена проблема электромагнитной совместимости мощных ПЧ-АВ с питающей сетью на металлургическом предприятии в России. Пять мощных электроприводов клеток и натяжной моталки были введены в работу

после реконструкции четырехклетьевого стана холодной прокатки. Электроприводы были реализованы на базе трехуровневых ПЧ-АВ серии ACS6000 фирмы ABB. Проведённые исследования доказали, что сильные искажения напряжения обусловлены взаимным влиянием индуктивностей сетевых трансформаторов главной понизительной подстанции и ёмкостью кабельных линий. Было выявлено, что заданы неоптимальные настройки применяемого алгоритма ШИМ с УВГ в АВ. Были предложены новые настройки алгоритма ШИМ с учётом удаления высокочастотных гармоник потребляемого тока, попадающих в резонансную область частотной характеристики питающей сети относительно секций главной понизительной подстанции (ГПП). Проведённые мероприятия позволили практически вдвое улучшить качество напряжения в точке общего подключения внутриводских потребителей.

Как показали исследования на металлургическом заводе «ММК Metalurji», имеются схожие проблемы с ЭМС ПЧ-АВ. При запуске стана горячей прокатки 1750 (HSM) и реверсивного стана холодной прокатки 1750 (CRM) обнаружилась невозможность работы в штатном режиме электроснабжения, когда два прокатных стана и другие второстепенные потребители запитаны от одного понизительного трансформатора 380/34,5 кВ. Низкое качество напряжения в распределительной сети предприятия приводило к аварийной работе чувствительных электроприёмников. В результате все ЭП стана горячей прокатки 1750 были вынуждены перевести на питание от резервного трансформатора с отдельной секции ГПП. Из-за этого отсутствует возможность проведения ремонтных мероприятий на трансформаторе, а также резерв. С целью разработки мероприятий, направленных на улучшение ЭМС

ПЧ-АВ с питающей сетью, были проведены экспериментальные исследования качества электроэнергии во внутризаводской распределительной сети 34,5 кВ металлургического завода ЗАО «ММК Metalurji».

ВНУТРИЗАВОДСКАЯ СИСТЕМА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Питание завода осуществляется по транзитной линии 380 кВ от Эрзин на Исдемир (рис. 1). На главной понижительной подстанции расположены четыре понижающих трансформатора 380/34,5 кВ номинальной мощностью 155 МВА, производства фирмы ABB. Трансформаторы Т3 и Т4 осуществляют питание сталеплавильного производства. Прокатное производство завода штатно должно быть запитано от одного трансформатора – Т1 или Т2.

Однако из-за вышеописанных проблем ЭП стана горячей прокатки HSM получают питание от трансформатора Т2. Для этого секция D ГПП была отключена от параллельной работы с секцией В и подключена к трансформатору Т2. Секция В ГПП была подключена к трансформатору Т1. От секции D ЗРУ-34,5 кВ ГПП получают питание секции 1 и 2 распределительного устройства 132EDM по двум кабельным линиям – КЛ1 и КЛ2. При этом секции 1 и 2 распределительного устройства 132EDM включены на параллельную работу.

От секции 1 распределительного устройства 132EDM запитаны ЭП двух черновых клетей R1 и R2,

первых двух чистовых клетей F1, F2 и тиристорные возбудители синхронных двигателей. От секции 2 получают питание оставшиеся два ЭП чистовых клетей F3, F4 и их возбудители. Электроприводы прокатного стана построены на базе преобразователя частоты серии ACS6000 фирмы ABB.

Для снижения негативного влияния ПЧ мощных ЭП прокатного стана HSM на питающую сеть применено следующее схемотехническое решение. Для реализации 12-пульсной схемы выпрямления в каждом ЭП применяются два трансформатора с различными группами соединения вторичных обмоток, имеющими угол сдвига напряжения в 30 электрических градусов. Первичная обмотка первого трансформатора выполняется расщеплённой и последовательно соединяется с первичной обмоткой второго трансформатора. Благодаря этому решению в гармоническом спектре потребляемого AED тока присутствуют высшие гармоники с порядковыми номерами $12n \pm 1$.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для анализа текущих режимов работы внутризаводской системы электроснабжения с помощью анализатора качества электроэнергии Fluke 435 (рис. 2) и токовых клещей Fluke i5s были записаны мгновенные значения напряжений и токов на различных участках распределительной сети. Точки подключения анализатора качества электроэнергии отмечены на рис. 1.

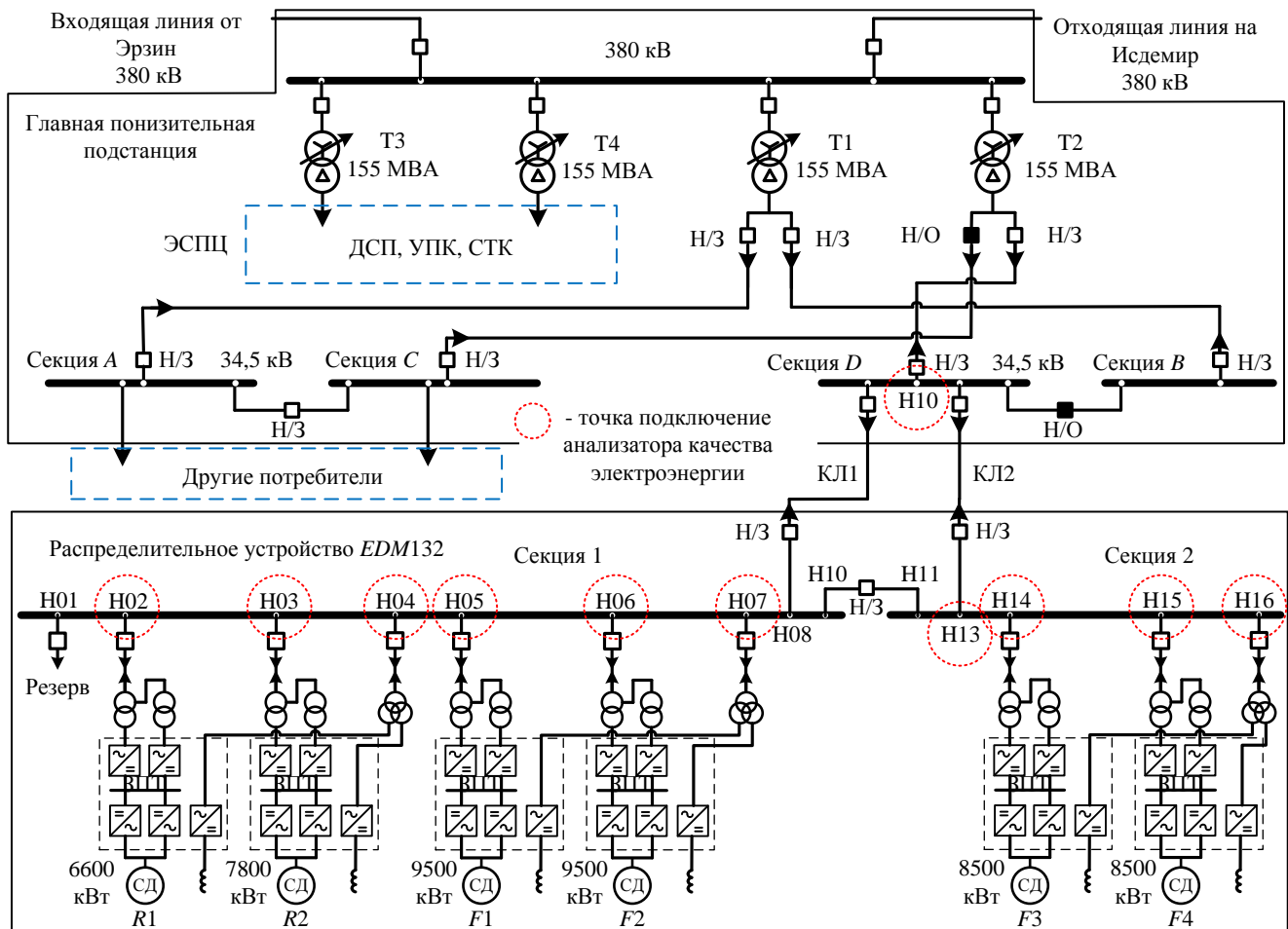


Рис. 1. Однолинейная схема системы электроснабжения электроприводов стана горячей прокатки



Рис. 2. Проведение экспериментальных исследований с использованием анализатора качества электроэнергии Fluke 435

Из-за аппаратных особенностей применяемого анализатора расчёт гармонического состава измеренных напряжений и токов проводился только до 150 гармоники.

На рис. 3 показаны измеренные мгновенные значения напряжений и токов на шинах секций ЗРУ-34,5 кВ ГПП и распределительного устройства 132EDM. На рис. 3, а, б приведены осциллограммы фазных напряжений на шинах секции D ЗРУ-34,5 кВ ГПП и гармонический состав напряжения фазы A во время работы стана горячей прокатки. Видно присутствие на значимом уровне гармоник с номерами 35, 37, 47, 49, 59, 61, 71, 73 и 95. Их присутствие обусловлено работой ПЧ-АВ. Значение суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения K_U составило 12,36, 12,73, 12,59% для фаз A, B, C соответственно. Столь сильные искажения питающего напряжения являются причиной нарушения нормального функционирования чувствительных электроприёмников при их параллельной работе с ЭП HSM.

Также на рис. 3, б, г, и, л показана частотная характеристика сети 34,5 кВ относительно секции D ГПП. Частотная характеристика была получена путём математического моделирования распределительной сети 34,5 кВ с использованием фактических параметров сетевого трансформатора 155 МВА и параметров кабельных линий в математическом пакете *Matlab-Simulink*. Благодаря полученной частотной характеристике можно заметить наличие основного резонанса тока в частотном диапазоне $f - 1850 \dots 3050$ Гц ($n = 37 \dots 61$).

На рис. 3, в, г приведена осциллограмма тока фазы A вводной ячейки H10 секции D ЗРУ-34 кВ ГПП и его гармонический состав для аналогичного предыдущему случаю момента времени. Действующая величина тока составила 383 А. Величина K_I составила 8,59%. В гармоническом спектре на значимом уровне присутствуют гармоники с теми же номерами, что и в предыдущем рассмотренном случае.

Далее были получены осциллограммы фазных напряжений и их гармонический состав для шин секций 1 и 2 ЗРУ-34,5 кВ распределительного устройства 132EDM при их параллельной работе (рис. 3, д, е). Запись мгновенных значений напряжений производилась при прокатке сляба станом HSM. Результаты измерений аналогичны результатам для секции D ЗРУ-34,5 кВ ГПП.

Затем были произведены измерения для тех же точек распределительной системы электроснабжения при остановленных электродвигателях ЭП прокатного стана.

На рис. 3, ж, и отображены осциллограммы фазных напряжений на шинах секции D ЗРУ-34,5 кВ ГПП и гармонический состав напряжения фазы A. Как и в случае работы стана при данном режиме, на значимом уровне в гармоническом спектре напряжения присутствуют гармоники с идентичными порядковыми номерами. Значение K_U увеличилось и составило 13,24% для напряжения фазы A. Значение K_U для напряжений фаз B и C составило 13,27 и 13,22% соответственно.

Осциллограмма тока фазы A на шину секции D ЗРУ-34 кВ ГПП и его гармонический состав показаны на рис. 3, к, л. Из-за низкой величины первой гармоники тока при работе АВ ЭП-в «на холостом ходу» значение коэффициента K_I тока ячейки H10 увеличилось на порядок по сравнению с предыдущим рассмотренным режимом работы стана.

На рис. 3, м, н показаны осциллограммы напряжений на секциях 1 и 2 распределительного устройства 132EDM, питающего ЭП стана HSM. Учитывая, что в момент измерений они были запитаны от шин секции D ГПП, результаты измерений идентичны.

Затем были записаны и проанализированы токи ЭП прокатного стана при прокатке металла станом (рис. 4) и при отсутствии сляба в прокатных клетях (рис. 5).

На рис. 4, а, б показана осциллограмма тока фазы A ячейки H02 и его гармонический состав. Ячейка H02 питает ЭП первой черновой клетки R1. При амплитудном значении величины первой гармоники тока в 97,32 А величина K_I составила 11,07%. Действующее значение тока фазы A составило 65 А. В гармоническом спектре на значимом уровне присутствуют гармоники с номерами 35, 37, 47, 49, 61.

Подобным образом выглядит и ток фазы A ячейки H03, от которой запитан ЭП второй черновой клетки R2 (рис. 4, в, г). Действующее значение тока фазы A равнялось 99 А. На значимом уровне присутствуют гармоники с номерами 35, 37, 47, 49, 59. Стоит отметить, что запись осциллограмм токов в различных ячейках распределительного устройства 132EDM производилась в разные моменты времени.

Ток фазы A ячейки H05 и его гармонический состав показан на рис. 4, д, е. Данная ячейка питает электропривод первой чистой клетки F1. Действующее значение тока фазы A составило 57 А.

Действующее значение тока фазы A ЭП клетки F2, запитанного от ячейки H06, на момент измерения было равно 75 А (рис. 4, ж, и). Следует отметить, что, кроме характерных для предыдущих случаев гармоник с номерами 35, 37, 47, 49, в гармоническом составе тока данного ЭП присутствуют значимые гармоники и с номерами 73 и 95 (рис. 4, и).

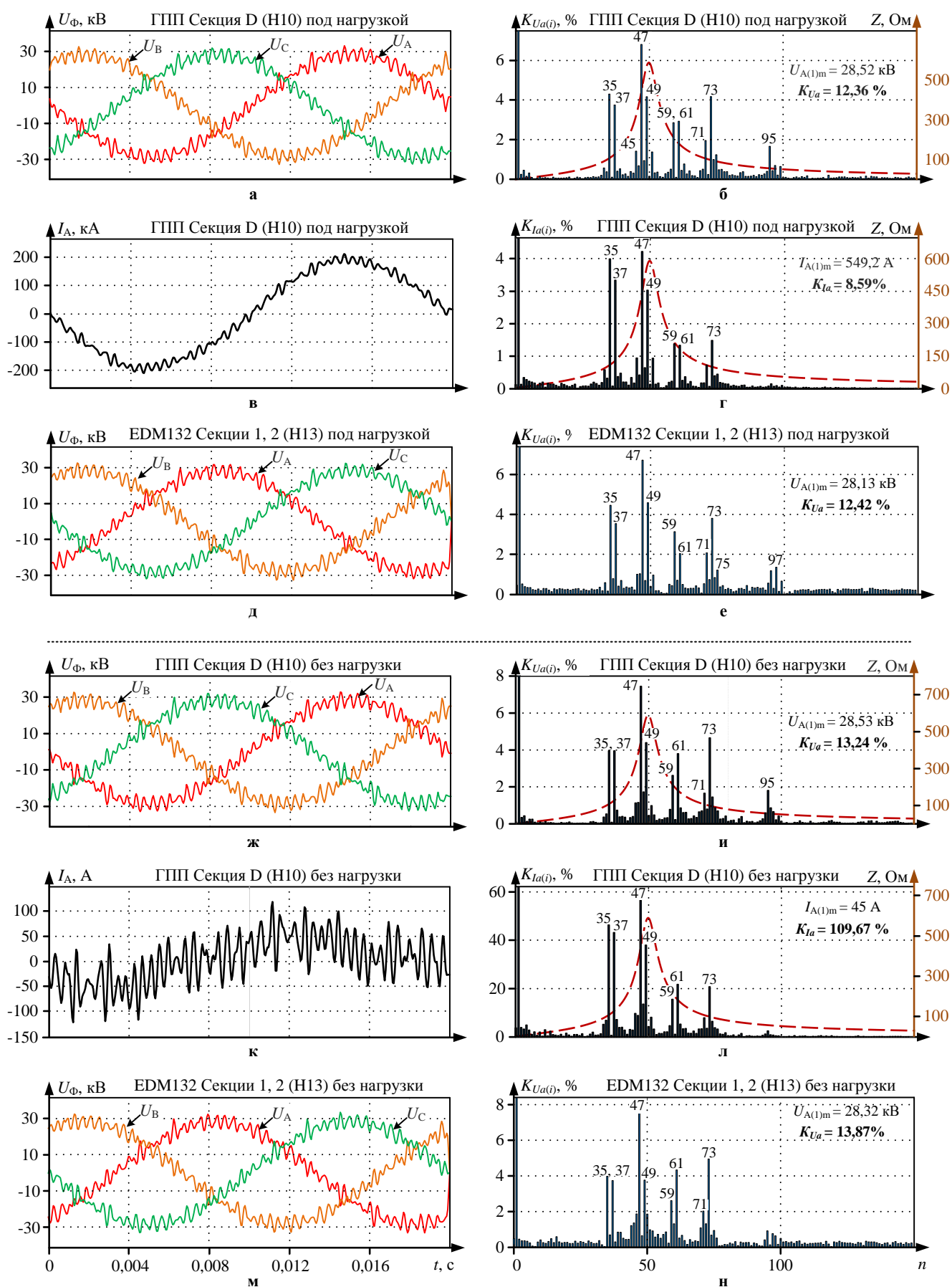


Рис. 3. Измеренные мгновенные значения напряжений и токов и их гармонический состав для двух точек измерения при различных режимах работы прокатного стана

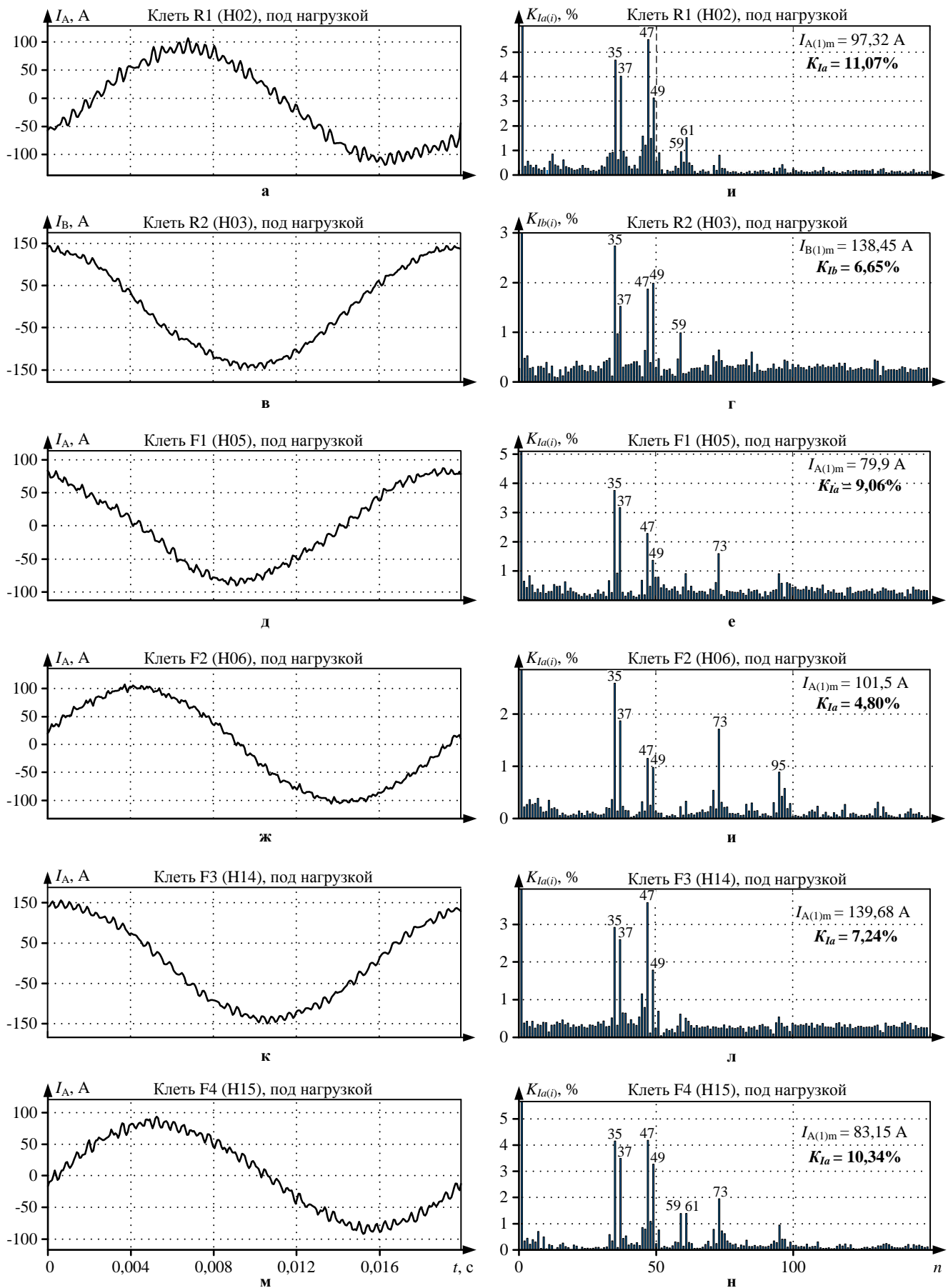


Рис. 4. Измеренные мгновенные значения токов электроприводов при работе стана и их гармонический состав

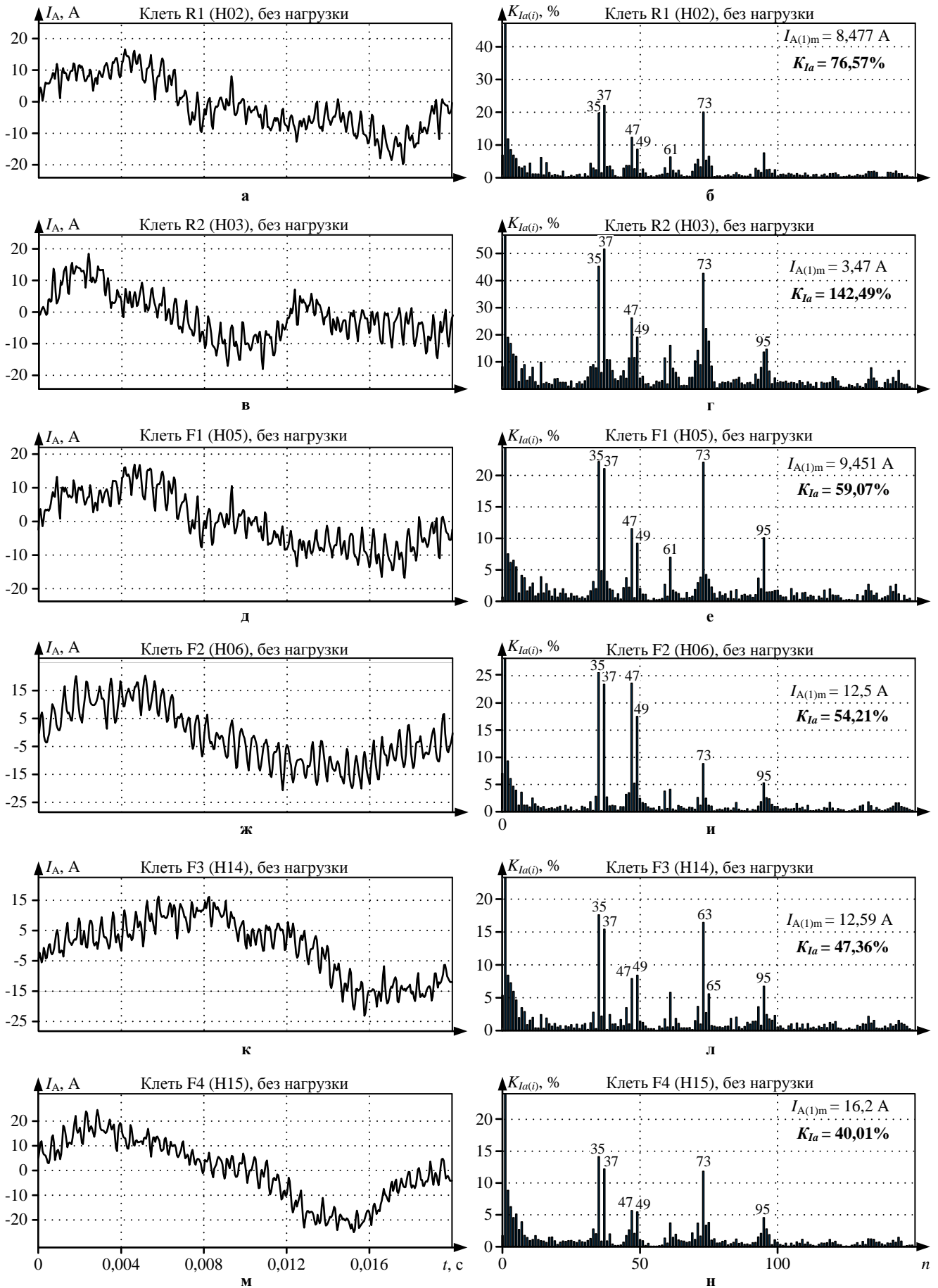


Рис. 5. Измеренные мгновенные значения токов электроприводов без нагрузки и их гармонической состав

Несмотря на это, величина K_I составила 4,8% и является минимальной среди всех рассмотренных случаев. Ток фазы A ячейки $H14$ и его гармонический состав показан на **рис. 4, к, л**. Ячейка $H14$ питает трансформаторы ЭП чистовой клетки $F3$. Действующее значение тока составило 98 А.

На **рис. 4, м, н** отображена осциллограмма тока фазы A ячейки $H15$ и его гармонический состав. От ячейки $H15$ распределительного устройства $132EDM$ запитан ЭП четвертой чистовой клетки $F4$. Величина K_I для тока фазы A составила 10,34% при действующем значении тока в 61 А.

В аналогичном порядке приведены осциллограммы фазных токов для электроприводов клеток $R1, R2, F1, F2, F3, F4$ при неработающем стане на **рис. 5**. Во всех случаях в гармоническом спектре токов на значимом уровне присутствуют высшие гармоники с номерами 35, 37, 47, 49, 61, 73, 95.

Для удобства все основные результаты исследований приведены в **таблице**.

Проанализировав полученные результаты, а также учитывая предыдущий опыт [8], можно предположить, что ПЧ-АВ используют алгоритм ШИМ с УВГ с 7-ю переключениями за четверть периода и удалением 6-ти первых значимых гармоник: 5, 7, 11, 13, 23, 25. Также является вероятным использование и других настроек контроллеров ШИМ: 9 переключений за четверть периода с удалением 8-ми первых значимых гармоник: 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25. В случае второго варианта можно произвести исключение гармоник 35 и 37 вместо 17, 19, так как гармоники 17 и 19 самоустраиваются за счёт эффекта 12-пульсной схемы выпрямления и не присутствуют в потребляемом токе ЭП. Однако в этом случае произойдёт увеличение амплитуд гармоник, оставшихся в гармоническом спектре токов ЭП.

В резонансную область частотной характеристики сети относительно шин секции D ЗРУ-34,5 кВ ГПП (см. **рис. 3, б**) попадают по большей части 47-я и 49-я гармоники тока, генерируемого ПЧ-АВ. В результате происходит их значительное усиление, что сказывается на качестве напряжения в точке общего подключения при текущем режиме работы системы электропитания.

Также отметим, что исследован был неосновной режим электроснабжения ЭП стана HSM . В случае основного режима от одного понизительного трансформатора 380/34,5 кВ частотная характеристика в точке общего потребления внутризаводских потребителей может отличаться значительно из-за смещения резонанса в левую часть частотного диапазона из-за увеличения суммарной ёмкости кабельных линий. В этом случае будет наблюдаться усиление гармоник $n = 35, 37$, что приведёт к ещё более сильному увеличению K_U и нарушению работы чувствительных электроприёмников.

Для улучшения качества электроэнергии в электротехнических комплексах, имеющих в своём составе мощные ПЧ-АВ, обычно применяются следующие технические решения [20]:

- 1) выделение отдельной секции для питания мощных ЭП на базе ПЧ-АВ (уже используется);
- 2) использование специальных алгоритмов ШИМ с целью исключения или снижения величины высших

гармонических составляющих потребляемого ЭП тока, попадающих в резонансную область, или качественная настройка их параметров с этой же целью;

3) применение традиционных фильтрокомпенсирующих устройств или специальных фильтров для сдвига основного резонанса в безопасную область.

Таблица

Результаты исследований

Точка измерения	Параметр	При нагрузке	Без нагрузки
ГПП, секция D, H10	$U_{A(I)m},$ кВ	28,52	28,53
	$K_U, \%$	12,36	13,24
	Значимые гармоники	35, 37, 47, 49, 59, 61, 71, 73, 95	35, 37, 47, 49, 59, 61, 71, 73, 95
	$I_{A(I)m},$ А	549,2	45,0
	$K_I, \%$	8,59	109,67
	Значимые гармоники	35, 37, 47, 49, 59, 61, 73	35, 37, 47, 49, 59, 61, 73
132EDM секция 2, H13	$U_{A(I)m},$ кВ	28,13	28,32
	$K_U, \%$	12,42	13,87
	Значимые гармоники	35, 37, 47, 49, 59, 61, 71, 73, 95, 97	35, 37, 47, 49, 59, 61, 71, 73
132EDM секция 1, H02 (R1)	$I_{A(I)m},$ А	97,3	8,48
	$K_I, \%$	11,07	76,57
	Значимые гармоники	35, 37, 47, 49, 59, 61, 73	35, 37, 47, 49, 61, 71, 73, 95
132EDM секция 1, H03 (R2)	$I_{A(I)m},$ А	138,5	3,47
	$K_I, \%$	6,65	142,5
	Значимые гармоники	35, 37, 47, 49, 59, 61, 73, 95	35, 37, 47, 49, 59, 61, 71, 73, 95
132EDM секция 1, H05 (F1)	$I_{A(I)m},$ А	79,9	9,45
	$K_I, \%$	9,06	59,1
	Значимые гармоники	35, 37, 47, 49, 61, 73, 95	35, 37, 47, 49, 59, 61, 71, 73, 95, 97
132EDM секция 1, H06 (F2)	$I_{A(I)m},$ А	101,5	12,6
	$K_I, \%$	4,80	54,3
	Значимые гармоники	35, 37, 47, 49, 73, 95	35, 37, 47, 49, 59, 61, 73, 95
132EDM секция 2, H14 (F3)	$I_{A(I)m},$ А	139,68	12,59
	$K_I, \%$	7,24	47,36
	Значимые гармоники	35, 37, 47, 49	35, 37, 47, 49, 51, 61, 63, 65, 95
132EDM секция 2, H15 (F4)	$I_{A(I)m},$ А	83,15	16,2
	$K_I, \%$	10,34	40,01
	Значимые гармоники	35, 37, 47, 49, 59, 61, 73, 95	35, 37, 47, 49, 73, 95

В рассматриваемом случае самым оптимальным вариантом будет использование специального корректирующего фильтра для сдвига основного резонанса в область частот $f - 850 \dots 1150$ Гц ($n = 17 \dots 23$) при основном режиме электроснабжения. В результате чего значимые высшие гармоники $n = 35, 37, 47, 49$, генерируемые АВ, не будут оказывать столь значимого воздействия на качество электроэнергии в точке общего подключения внутризаводских потребителей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведены исследования качества напряжения во внутризаводской распределительной сети 34,5 кВ металлургического завода ЗАО «ММК Metalurji». Электротехнический комплекс предприятия имеет в своём составе мощные электроприводы стана горячей прокатки на базе ПЧ-АВ. В результате исследований были выявлены сильные ухудшения качества напряжения вследствие влияния резонансных явлений в частотной характеристике питающей сети 34,5 кВ из-за наложения на частотный диапазон резонанса основных высокочастотных гармоник, генерируемых электроприводами клеток стана горячей прокатки.

2. Проанализированы параметры существующих алгоритмов ШИМ, применяемых для АВ в составе ЭП клеток стана горячей прокатки. Анализ показал, что используется алгоритм ШИМ с УВГ с частотой переключения ключей 450 Гц. Имеются резервы для улучшения режимов работы электроприводов за счёт увеличения частоты коммутации до 550 Гц (11 переключений за четверть периода), что позволит удалить дополнительные гармоники, попадающие в частотный диапазон резонанса.

3. Предложены также альтернативные мероприятия по улучшению качества электроэнергии за счёт установки фильтров высших гармоник либо специального корректирующего фильтра, обеспечивающего сдвиг основного резонанса в низкочастотную область и исключение наложения гармоник АВ с резонансным диапазоном. Сказано, что использование специального корректирующего фильтра будет являться наиболее оптимальным решением вследствие его простоты и дешевизны.

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-19-20069).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Nikolaev A.A., Bulanov M.V., Antropova L.I. Ways to Ensure Electromagnetic Compatibility of Powerful Frequency Converters in Internal Power Supply Systems of Industrial Enterprises in the Presence of Resonance Phenomena // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 2019. Pp. 1-6. doi: 10.1109/ICIEAM.2019.8742938
- Экспериментальные исследования электромагнитной совместимости современных электроприводов в системе электроснабжения металлургического предприятия / А.А. Николаев, Г.П. Корнилов, Т.Р. Храмин, Г.В. Никифоров, Ф.Ф. Муталлапова // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т.14. №4. С. 96-105. doi:10.18503/1995-2732-2016-14-4-96-105
- Reactive power compensation in industrial grid via highpower adjustable speed drives with medium voltage 3L-NPC VTB converters / A.A. Radionov, V.R. Gasiyarov, A.S. Maklakov, E.A. Maklakova // International Journal of Power Electronics and Drive Systems. 2017. № 8(4). Pp. 1455-1466. doi: 10.11591/ijpeds.v8.i4.pp1455-1466
- Маклаков А.С. Имитационное моделирование главного электропривода прокатной клетки толстолистового стана 5000 // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2014. №3. С. 16-25.
- Храмин Т.Р., Корнилов Г.П., Крубцов Д.С. Оценка методов широтно-импульсной модуляции напряжения активных выпрямителей прокатных станов // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2013. №2. С. 48-53.
- O'Brien K., Teichmann R., Bernet S. Active rectifier for medium voltage drive systems // Applied Power Electronics Conference and Exposition. IEEE, 2001. Pp. 557-562. doi: 10.1109/APEC.2001.911701
- Kornilov G.P., Khramshin T.R., Abdulvelev I.R. Increasing stability of electric drives of rolling mills with active front ends at voltage sag // International Conference on Electro-technical Complexes and Systems (ICOECS). 2019. Pp. 1-4. doi: 10.1109/ICOECS46375.2019.8949945
- Providing Electromagnetic Compatibility of High-Power Frequency Converters with Active Rectifiers at Internal Power Supply System of Cherepovets Steel Mill / A.A. Nikolaev, I.G. Gilemov, M.V. Bulanov, V.I. Kosmatov // XVIII International Scientific Technical Conference Alternating Current Electric Drives (ACED). 2021. Pp. 1-8. doi: 10.1109/ACED50605.2021.9462264
- Retrofit of a hot rolling mill plant with three-level active front end drives / G.A. Orcajo, J.R. D., J.M. Cano, J.G. Norriella, P.G. Ardura, R.T. Llera, D.R. Cifrián // IEEE Transactions on Industry Applications. IEEE, 2018. No 54(3). Pp. 2964-2974. doi: 10.1109/TIA.2018.2808159
- Design and Analysis of Electrical Drives Using Active Front End Converter / K.B. Chimonyo, K.K. Sathish, K.B. Kishore, K. Ravi // Second International Conference on Inventive Communication and Computational Technologies (ICICCT). 2018. Pp. 115-119. doi: 10.1109/ICICCT.2018.8473042
- Ndokaj A., Di Napoli A. Behavior of an Active Front End in presence of voltage sags // International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion. 2014. Pp. 1208-1212. doi: 10.1109/SPEEDAM.2014.6872043
- Ndokaj A., Di Napoli A. Active front end in presence of voltage notches // International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP). 2015. Pp. 9-13. doi: 10.1109/ICCEP.2015.7177593
- Dell'Aquila A., Liserre M., Monopoli V.G. Active front end adjustable speed drives under grid voltage sags: effects and dynamical performance evaluation // European Conference on Power Electronics and Applications. 2005. Pp. 1-10. doi: 10.1109/EPE.2005.219589
- Karshenas H.R., Kojori H.A., Dewan S.B. Generalized techniques of selective harmonic elimination and current control in current source inverters/converters // IEEE Transactions on Power Electronics. 1995. Vol. 10. No. 5. Pp. 566-573. doi: 10.1109/63.406844
- Turnbull F.G. Selected harmonic reduction in static DC-AC inverters // IEEE Trans. Commun. Electron. 1964. Vol. 83. No. 73. Pp. 374-378. doi: 10.1109/TCOME.1964.6541241
- Jing T., Maklakov A., Radionov A. Two Selective Harmonic Control Techniques Applied in 10kV Grid with Three-Level NPC Inverter // IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI). IEEE, 2019. Pp. 75-79. doi: 10.1109/PEAMI.2019.8915413
- Research on hybrid SHEPWM based on different switching patterns / T. Jing, A. Maklakov, A. Radionov, S. Baskov, A. Kulmukhametova // International Journal of Power Electronics and Drive Systems. 2019. No. 10(4). Pp. 1875-1884.

doi: 10.11591/ijpeds.v10.i4.pp1875-1884

18. Furukawa K., Miyazaki H. Solution for SHE-PWM: Non-iterative computation algorithm based on trigonometric harmonic cancellation rule // 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE). 2013. Pp. 1-10. doi: 10.1109/EPE.2013.6631893
19. Rai N., Chakravorty S. A Review on the Generalized Formulations for Selective Harmonic Elimination (SHE-PWM) strategy // IEEE First International Conference on Smart

- Technologies for Power, Energy and Control (STPEC). 2020. Pp. 1-6. doi: 10.1109/STPEC49749.2020.9297733
20. Разработка научно обоснованных технических решений по обеспечению электромагнитной совместимости мощных промышленных электроприводов с питающей сетью: монография / Николаев А.А., Буланов М.В., Гилемов И.Г., Афанасьев М.Ю., Шахбиева К.А., Лаптова В.А. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2021. 330 с.

Поступила в редакцию 30 мая 2022 г.

INFORMATION IN ENGLISH

EXPERIMENTAL STUDIES OF POWER QUALITY IN THE 34.5 kV NETWORK AT MMK METALURJI

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>

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>

Sergey A. Linkov

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Automated Electric Drive and Mechatronics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, xx_linkov@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0774-3910>

Maksim S. Svetlakov

Student, Department of Automated Electric Drive and Mechatronics, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, smsko987@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7288-8262>

Medium voltage distribution networks of 6–35 kV are used in in-plant power supply systems at steel mills. As a mutual influence result of long cable line capacitances and step-down transformer inductances, resonance phenomena can occur in the medium frequency range. If the high-frequency harmonics generated by frequency converters with active rectifiers fall into the resonant range, this can lead to disturbances in the plant internal distribution network. Such phenomena can cause long downtime of technological equipment and product defects. This entails significant economic losses, especially in the production of high value-added products. This paper reflects the experimental research results of voltage quality in 34.5 kV distribution networks at the metallurgical plant "MMK Metalurji". The purpose of the experimental studies was to analyze the current operating modes of the power supply system in order to develop scientifically substantiated technical measures aimed at improving the voltage quality at the point of common connection with internal consumers in the main mode of the power supply system operation. The Fluke 435 power quality analyzer and the Fluke i5s current clamp were used in the experimental studies. Measures for electromagnetic compatibility improvement of frequency converters with active rectifiers of electric drives in hot strip mill 1750 with supply mains are proposed.

Keywords: internal power supply network, power system, power quality, frequency converter, active front end, pulse width modulation, electromagnetic compatibility, current resonance, frequency characteristic

REFERENCES

1. Nikolaev A.A., Bulanov M.V., Antropova L.I. Ways to Ensure Electromagnetic Compatibility of Powerful Frequency Converters in Internal Power Supply Systems of Industrial Enterprises in the Presence of Resonance Phenomena. 2019

- International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). IEEE, 2019, pp. 1-6. doi: 10.1109/ICIEAM.2019.8742938
2. Nikolaev A.A., Kornilov G.P., Khrumshin T.R., Nikiforov G., Mutallapova F.F. Experimental studies of electromagnetic compatibility of modern electric drives in the power supply system of industrial enterprises. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Bulletin of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2016, vol. 14, no. 4, pp. 96-103. (In Russian)
3. Radionov A.A., Gasiyarov V.R., Maklakov A.S., Maklakova E.A. Reactive power compensation in industrial grid via high-power adjustable speed drives with medium voltage 3L-NPC BTB converters. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, 2017, no. 8(4), pp. 1455-1466. doi: 10.11591/ijpeds.v8.i4.pp1455-1466
4. Maklakov A.S. Simulation of the main electric drive of the plate mill rolling stand. *Mashinostroenie: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Russian Internet Journal of Industrial Engineering], 2014, no. 3, pp. 16- 25. (In Russian) doi:10.18503/1995-2732-2016-14-4-96-105
5. Khrumshin T.R., Kornilov G.P., Krubtsov D.S. Evaluation of methods of PWM voltage active rectifiers at rolling mills. *Mashinostroenie: setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal* [Russian Internet Journal of Industrial Engineering], 2013, no. 2, pp. 48-53. (In Russian)
6. O'Brien K., Teichmann R., Bernet S. Active rectifier for medium voltage drive systems. Applied Power Electronics Conference and Exposition. APEC 2001. IEEE, 2001, pp. 557-562. doi: 10.1109/APEC.2001.911701
7. Kornilov G.P., Khrumshin T.R., Abdulvelev 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

8. Nikolaev A.A., Gilemov I.G., Bulanov M.V., Kosmatov V.I. Providing Electromagnetic Compatibility of High-Power Frequency Converters with Active Rectifiers at Internal Power Supply System of Cherepovets Steel Mill. 2021 XVIII International Scientific Technical Conference Alternating Current Electric Drives (ACED). IEEE, 2021, pp. 1-8. doi: 10.1109/ACED50605.2021.9462264
9. Alonso Orcajo G., Josué Rodríguez D., Cano José M., Normiella Joaquín G., Pablo Ardura G., Rocío Llera T., Diego Cifrián R. Retrofit of a hot rolling mill plant with threelevel active front end drives. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 54, no. 3, pp. 2964-2974. doi: 10.1109/TIA.2018.2808159
10. Chimonyo K.B., Sathish Kumar K., Kishore Kumar B., Ravi K. Design and Analysis of Electrical Drives Using Active Front End Converter. 2018 Second International Conference on Inventive Communication and Computational Technologies (ICICCT). IEEE, 2018, Pp. 115-119. doi: 10.1109/ICICCT.2018.8473042
11. Ndokaj A., Di Napoli A. Behavior of an Active Front End in presence of voltage sags. 2014 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion. IEEE, 2014, pp. 1208-1212. doi: 10.1109/SPEEDAM.2014.6872043
12. Ndokaj A., Di Napoli A. Active front end in presence of voltage notches. 2015 International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP). IEEE, 2015, pp. 9-13. doi: 10.1109/ICCEP.2015.7177593
13. Dell'Aquila A., Liserre M., Monopoli V.G. Active front end adjustable speed drives under grid voltage sags: effects and dynamical performance evaluation. 2005 European Conference on Power Electronics and Applications. IEEE, 2005, pp. 1-10. doi: 10.1109/EPE.2005.219589
14. Karshenas H.R., Kojori H.A., Dewan S.B. Generalized techniques of selective harmonic elimination and current control in current source inverters/converters. IEEE Transactions on Power Electronics, 1995, vol. 10, no. 5, pp. 566-573. doi: 10.1109/63.406844.
15. Turnbull F. G. Selected harmonic reduction in static DC-AC inverters // IEEE Trans. Commun. Electron, 1964, vol. 83, no. 73, pp. 374-378. doi: 10.1109/TCOME.1964.6541241
16. Jing T., Maklakov A., Radionov A. Two Selective Harmonic Control Techniques Applied in 10kV Grid with Three-Level NPC Inverter. 2019 IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI). IEEE, 2019, pp. 75-79. doi: 10.1109/PEAMI.2019.8915413
17. Jing T., Maklakov A., Radionov A., Baskov S., Kulmukhametova A. Research on hybrid SHEPWM based on different switching patterns. International Journal of Power Electronics and Drive Systems, 2019, no. 10(4), pp. 1875-1884. doi: 10.11591/ijpeds.v10.i4.pp1875-1884
18. Furukawa K., Miyazaki H. Solution for SHE-PWM: Non-iterative computation algorithm based on trigonometric harmonic cancellation rule. 2013 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE). IEEE, 2013, pp. 1-10. doi: 10.1109/EPE.2013.6631893
19. Rai N., Chakravorty S. A Review on the Generalized Formulations for Selective Harmonic Elimination (SHE-PWM) strategies for Power, Energy and Control (STPEC). IEEE, 2020, pp. 1-6. doi: 10.1109/STPEC49749.2020.9297733
20. Nikolaev A.A., Bulanov M.V., Gilemov I.G., Afanasyev M.Ju., Shahbieva K.A., Laptova V.A. *Razrabotka nauchno obosnovannyh tehnikeskih reshenij po obespecheniju jelektromagnitnoj sovmestimosti moshhnyh promyshlennyh jelektroprivodov s pitajushhej setju* [Development of scientifically based technical solutions to ensure the electromagnetic compatibility of powerful industrial electric drives with a supply network]. Magnitogorsk, NMSTU Publ., 2021, 330 p. (In Russian)

Экспериментальные исследования качества электроэнергии в сети 34,5 кВ металлургического завода ЗАО «ММК Metalurji» / А.А. Николаев, И.Г. Гилемов, С.А. Линьков, М.С. Светлаков // Электротехнические системы и комплексы. 2022. № 3(56). С. 44-53. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-3\(56\)-44-53](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-3(56)-44-53)

Nikolaev A.A., Gilemov I.G., Linkov S.A., Svetlakov M.S. Experimental Studies of Power Quality in the 34.5 kV Network at MMK Metalurji. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2022, no. 3(56), pp. 44-53. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-3\(56\)-44-53](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2022-3(56)-44-53)