

## ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА

УДК 621.77.016.3

©Гаврилов Ф.А.<sup>1</sup>, Коляда Л.И.<sup>2</sup>, Цибуля В.В.<sup>3</sup>

### НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ЗАМЕНЫ СИСТЕМЫ ГЛАВНОГО ПРИВОДА ГЕНЕРАТОР - ДВИГАТЕЛЬ НА ТИРИСТОРНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ДВИГАТЕЛЬ ИЛИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ – АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ НА СТАНЕ ХОЛОДНОГО ПРОКАТА

*В статье рассмотрены варианты модернизации привода стана холодной прокатки и проанализирован один из аспектов переоборудования - изменение параметров качества электроэнергии питающей сети. Получены значения токов и напряжений высших гармоник при использовании систем генератор - двигатель, тиристорный преобразователь – двигатель и асинхронный двигатель – преобразователь частоты.*

**Ключевые слова:** 4-х клетьевого прокатный стан, качество электроэнергии, коэффициент искажения синусоидальности напряжения, высшие гармоники.

*Гаврилов Ф.А., Коляда Л.И., Цибуля В.В. Деякі аспекти заміни системи головного привода генератор - двигун на тиристорний перетворювач двигун або перетворювач частоти - асинхронний двигун на стані холодного прокату. У статті розглянуті варіанти модернізації приводу стану холодної прокатки і проаналізовано один з аспектів переобладнання – зміна параметрів якості електроенергії живильної мережі. Отримані значення струмів і напруг вищих гармонік при використанні систем генератор - двигун, тиристорний перетворювач - двигун і асинхронний двигун - перетворювач частоти.*

**Ключові слова:** 4-х клітьовий прокатний стан, якість електроенергії, коефіцієнт спотворення синусоїдальності напруги, вищі гармоніки.

*F.A. Gavrilov, L.I. Kolyada, V.V. Tsybulya. Some aspects of the replacement of the main drive for generator - engine on thyristor converters - engine or inverters - induction motor on the condition of cold-rolled. The paper considers the options for upgrading the drive cold-rolling mill and analyzed one aspect of the conversion - to change the parameters of quality of electricity supply. The values of voltage and current harmonics when using the generator - motor systems, thyristor converter – motor and induction motor - frequency converter.*

**Keywords:** 4-cage mill, power quality, distortion factor sinusoidal voltage harmonics.

**Постановка проблемы.** В связи с изменением конъюнктуры мирового рынка стали роль станов холодной прокатки и качество его продукции значительно возросла. Тонколистовая сталь холодной прокатки находит применение в различных отраслях хозяйства, - начиная от изготовления товаров широкого профиля применения, имеющих значительную добавленную стоимость (жесть, строительный лист) и заканчивая товарами обладающими большой добавленной стоимостью (прокат с полимерным покрытием, профнастил и т.д.). Производство данных продуктов позволит расширить сортамент продукции и увеличить количество заказчиков. С другой стороны, требования предъявляемые заказчиками непрерывно растут, что приводит к необходимости непрерывного повышения качества выпускаемой продукции. Следовательно, без изменения отношения к производству любой изготовитель может потерять часть

<sup>1</sup> канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

<sup>2</sup> канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

<sup>3</sup> аспирантка, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

рынков сбыта, что приведет к снижению доходов.

Большинство станов холодного проката были построены в 60–70 гг. прошлого века, когда требования к качеству продукции, производительности труда и общей энергоэффективности были существенно меньше, чем в настоящее время. Вследствие значительного прогресса в области автоматизации производственных процессов, появления новой элементной базы и др. появилась возможность более эффективно решать вопросы энергопотребления, которые во многом зависят от качества электроэнергии. Следовательно, модернизация существующего оборудования станов в современных условиях является необходимостью.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Развитию теории и практики непрерывной прокатки способствовали труды Дружинина Н.Н., Бычкова В.П., Бройдо Б.С., Целикова А.И., Филатова А.С., Морозовского В.Г., Колядича В.М., Мирера А.Г. и других авторов, а также исследования и разработки Московского энергетического института, ВНИИМЕТМАШа и др.

**Цель статьи** – проанализировать один из аспектов переоборудования (изменение параметров качества электроэнергии питающей сети) при замене системы электропривода клетей генератор – двигатель (Г–Д) на систему тиристорный преобразователь – двигатель (ТП–Д) или на систему асинхронный двигатель – преобразователь частоты (АД – ПЧ).

**Изложение основного материала.** При анализе рассмотрен типовой стан холодного проката, состоящий из 4-х рабочих клетей, расположенных последовательно. Прокатка в таких станах происходит одновременно во всех клетях при неизменном направлении движения металла. Число обжатый равно числу клетей. Для разматывания листа в начале стана устанавливается разматыватель, а для наматывания листа после прокатки в конце стана – моталка. Все клетки стана имеют индивидуальный привод валков.

Привод головок разматывателя осуществляется от двух двигателей с параллельным соединением якорей. Питание двигателей каждой клетки осуществляется от индивидуальных генераторов. Два приводных синхронных двигателя приводят во вращения четыре генератора [1].

Достоинства такой системы: наличие хороших динамических свойств, допускающих получение разнообразных характеристик в переходных режимах; простота и экономичность управления; большой диапазон и плавность регулирования скорости.

Недостатки: сравнительно низкий коэффициент полезного действия (КПД);  $\eta = 0,6 \div 0,8$ , затруднения связанные с автоматизацией всего процесса производства, приводящие к снижению как качества, так и количества проката; из-за особенностей оборудования, затраты на ремонт, могут превышать затраты на модернизацию; наличие избыточных машин (двигатель – генератор – двигатель) приводит к понижению надежности работы и возрастанию стоимости ремонтов.

Для оценки показателей качества электроэнергии (ПКЭ) проведены экспериментальные исследования на одном из станов холодной прокатки с четырьмя рабочими клетями. Упрощенная схема электроснабжения стана представлена на рисунке 1.

Измерялись следующие ПКЭ в соответствии с ГОСТ 13109-97: кратковременная доза фликера  $P_{st}$ ; длительная доза фликера  $P_{lt}$ ; коэффициент искажения синусоидальности напряжения  $K_U$ ; коэффициенты отдельных гармонических составляющих  $K_{U(n)}$ .

Измерения выполнялись с помощью прибора Fluke 435 – анализатор качества электроэнергии. Абсолютные погрешности измерений коэффициентов гармонических составляющих напряжения составляли  $\pm 0,05\%$  при значениях этих коэффициентов до 1%. Относительные погрешности измерений этих коэффициентов (в случае превышения ими величины 1%), а также коэффициента искажения синусоидальности напряжения, не превышали 5%.

Измерения проводились в нескольких ремонтных и рабочих режимах:

1 режим (ремонтный режим № 1). В этом режиме в цехе холодного проката не работает 4-х клетевой прокатный стан. Работает только непрерывно – травильный агрегат. Трансформатор № 1 выведен в ремонт, а нагрузка 2–го трансформатора не превышает 5%.

2 режим (ремонтный режим № 2), при котором в цехе холодного проката не работает 4-х клетевой прокатный стан. Работает станция защиты газов и термическое отделение. Трансформатор № 2 выведен в ремонт, в работе трансформатора № 1.

3 режим (рабочий № 1); в цехе работает только 4-х клетевой прокатный стан.

4 режим (рабочий № 2); в цехе работает 4-х клетьевого прокатный стан и дрессировочный стан.

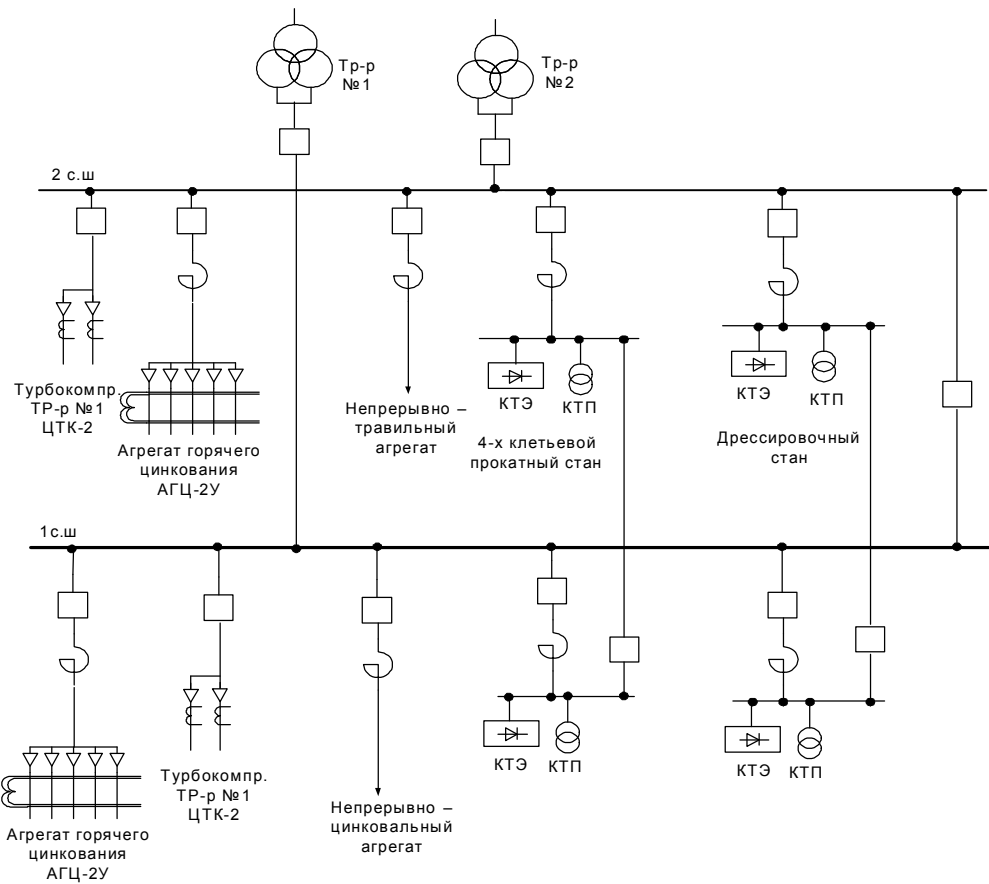


Рис. 1 – Упрощенная схема стана

Результаты измерений представлены в таблицах 1 и 2.

По результатам измерений видно, что все измеренные параметры качества электроэнергии не превышают 60% установленных значений ГОСТа 13109-97. Наиболее высокие значения имеет коэффициент искажения синусоидальности напряжения  $K_U$ , который определяется отношением действующего значения высших гармоник (ВГ) напряжения  $U_v$  к напряжению основной частоты  $U_1$  или номинальному напряжению:

$$K_U = \frac{\sqrt{\sum_{v=2}^{\infty} U_v^2}}{U_1} \cdot 100 \approx \frac{\sqrt{\sum_{v=2}^{\infty} U_v^2}}{U_{ном}} \cdot 100, \quad (1)$$

где  $U_v$  – действующее значение напряжения;

$v$ –й гармоники, В (кВ);

$n$  – номер последней из учитываемых гармоник [2].

Поэтому оценку КЭ при замене системы Г–Д проведем именно по этому параметру.

Для расчета  $K_U$  на основании однолинейной схемы электроснабжения представленной на рис. 1 составлена расчетная схема замещения (рис. 2) Основные допущения, которые принимались при составлении схемы замещения:

- в цехе работает только один трансформатор, 4-х клетьевого прокатный стан и дрессировочный стан;
- не учтены активные сопротивления элементов и сопротивления кабельных линий, поскольку длина их не превышала 500м;
- основными источниками высших гармоник являются 6-ти пульсные комплектные тиристор-

ные преобразователи вспомогательных механизмов (транспортёры, разматыватели, моталки и т. д.) общая мощность которых не превышает 8,7 МВА.

Таблица 1

Результаты измерения колебаний напряжения

Доза фликера	Линейное напряжение												Нормально допустимые значения в соответствии с ГОСТ 13109-97
	1 режим			2 режим			3 режим			4 режим			
	AB	BC	CA	AB	BC	CA	AB	BC	CA	AB	BC	CA	
Кратковременная $P_{st}$	0,37	0,39	0,35	0,5	0,49	0,5	0,56	0,55	0,62	0,67	0,62	0,61	1,38
Длительная $P_{lt}$	0,22	0,23	0,21	0,37	0,28	0,34	0,41	0,43	0,45	0,47	0,5	0,51	1,0

Таблица 2

Результаты измерений уровня несинусоидальности напряжения

Номер гармоники n	Коэффициенты гармонических составляющих напряжения, %												Нормально допустимые значения в соответствии с ГОСТ 13109-97
	Линейное напряжение												
	1 режим			2 режим			3 режим			4 режим			
	AB	BC	CA	AB	BC	CA	AB	BC	CA	AB	BC	CA	
3	0,48	0,35	0,14	0,55	0,22	0,38	1	1,2	1	1,35	1,24	1,15	1,5
5	0,44	0,34	0,4	0,46	0,36	0,47	2	2,18	2,1	1,93	1,8	1,95	4,0
7	0,25	0,29	0,28	0,33	0,33	0,32	0,68	0,7	0,76	0,7	0,66	0,8	3,0
11	0,17	0,21	0,2	0,33	0,32	0,35	0,17	0,14	0,16	0,77	0,87	0,92	2,0
13	0,19	0,22	0,18	0,25	0,25	0,23	0,58	0,57	0,62	0,56	0,5	0,5	2,0
23	0,21	0,22	0,23	0,24	0,23	0,23	0,7	0,65	0,67	0,4	0,45	0,4	1,0
25	0,23	0,23	0,19	0,28	0,26	0,25	0,4	0,34	0,3	0,22	0,24	0,23	1,0
Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения, %													
$K_U$	0,74	0,75	0,71	1,2	1,1	1,0	2,2	2,5	2	3,3	3,2	3	5

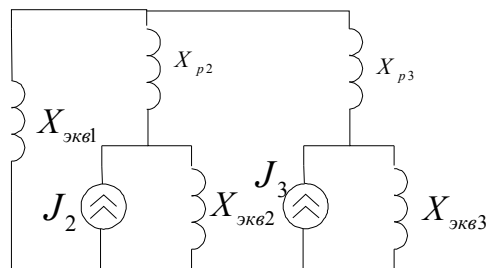


Рис. 2 – Схема замещения 4-х клетьевого стана для расчета высших гармоник

Расчет параметров схемы замещения проводился на основании выражений для определения сопротивлений  $v$ -й гармоники отдельных элементов [3]. При расчете учитывались уровни 5,7,11 и 13 гармоники.

Порядок (номер) высших гармоник для 6-ти импульсных комплектов тиристорных преобразователей определяется выражением:

$$v = kp \pm 1, \quad (2)$$

где  $p$  – пульсность преобразователя;  
 $k = 1, 2, 3, \dots$

Номинальный ток преобразователя  $I_{нВП}$ , определяется известным соотношением [3]:

$$I_{нВП} = \frac{S_{ном} \cdot \kappa_3}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}}, \quad (3)$$

где  $S_{ном}$  – номинальная мощность преобразователя;  
 $U_{ном}$  – номинальное напряжение сети;  
 $\kappa_3$  – коэффициент загрузки.

Токи высших гармоник равны

$$I_v = \frac{I_{нВП}}{v}, \quad (4)$$

где  $I_v$  – ток  $v$ - гармоник;  
 $v$  – номер гармоники.

Напряжения ВГ (фазные)  $U_v$  определяются как:

$$U_{vf} = I_v |z_{v\kappaв}|, \quad (5)$$

где  $z_{v\kappaв}$  – эквивалентное сопротивление токам  $v$ -х гармоник.

Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения, %

$$K_U = \frac{\sqrt{3} \cdot \sqrt{\sum_{v=2}^{\infty} U_{vf}^2}}{U_{ном}} \cdot 100. \quad (6)$$

Результаты расчетов представлены в таблице 3.

Таблица 3

Значения токов и напряжений ВГ при системе Г-Д

$v$	5	7	11	13
$I_v$ , кА	0,11	0,015	0,006	0,005
$U_{vf}$ , кВ	0,18	0,07	0,03	0,01

Расчеты показали, что коэффициент искажения синусоидальности напряжения составляет  $K_U = 3,1$  %. По сравнению с экспериментальными значениями погрешность расчетов не превышает допустимые для инженерных расчетов 10%.

Рассмотрим систему ТП–Д мощностью 15 МВА (рис. 3), принятую для сравнительного анализа. Это 12-ти пульсная схема, состоящая из 2–х параллельно включенных 6–ти пульсных выпрямителей, поэтому согласно формуле (2) высшими гармониками, которые необходимо учитывать является 11, 13, 23 и 25.

Применение 12-ти пульсной схемы выпрямления позволит уменьшить пульсацию выпрямленного напряжения и улучшить форму тока, потребляемого из питающей сети, приблизить ее к синусоидальной.

Преимуществом тиристорного преобразователя в сравнении с системой Г-Д является:

- отсутствие вращающихся частей, что упрощает обслуживание и увеличивает надежность работы схемы;
- КПД увеличивается до 0,95;
- система ТП-Д имеет постоянную готовность к работе.

Недостатками тиристорного преобразователя являются изменяющийся в широких пределах коэффициент мощности  $\cos\varphi = 0,72 \div 0,9$  и большие искажения формы потребляемого из сети тока [4].

Для оценки качества электроэнергии при использовании системы ТП-Д в существующую

схему замещения (рис. 2) добавляем источник высших гармоник – тиристорный преобразователь, который планируется применить для замены системы Г–Д (рис. 4 а, б).

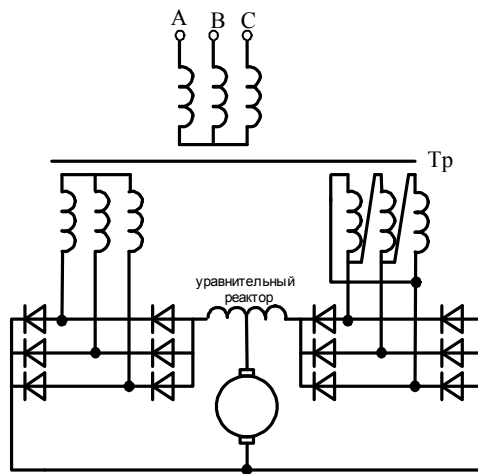
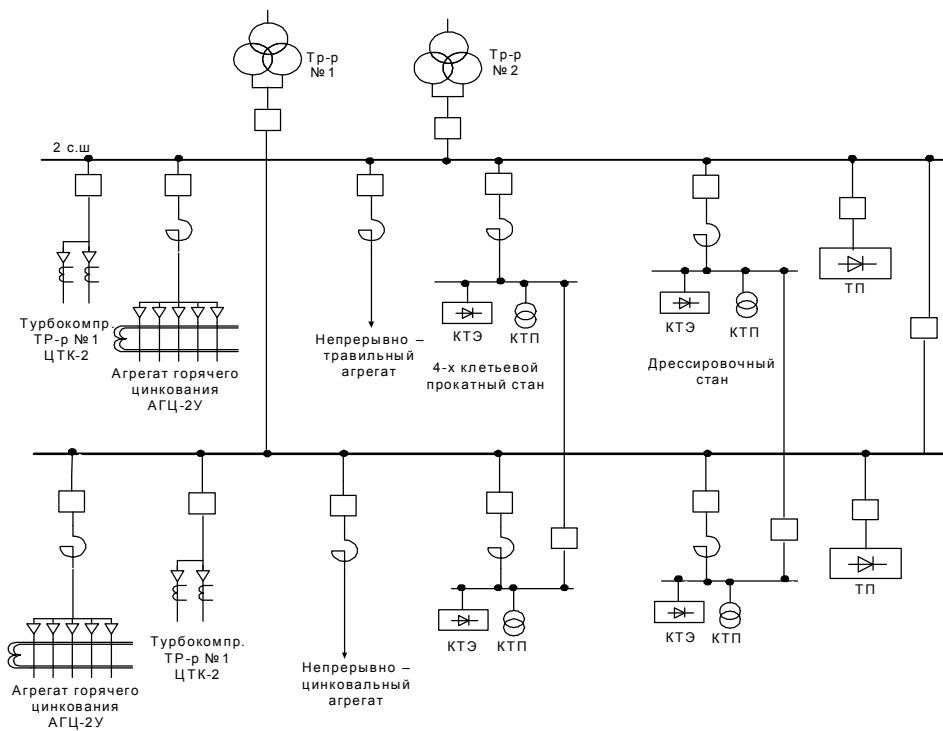
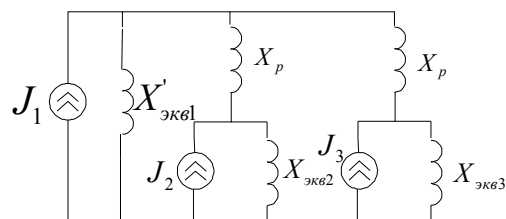


Рис. 3 – Трехфазный двухмостовой выпрямитель с параллельным соединением мостов



а)



б)

Рис. 4 – Расчетная схема (а), схема замещения (б) системы ТП–Д

Ток высших гармоник в относительных единицах рассчитывается по упрощенной формуле (3):

$$I_{v*} = \frac{1}{\left(v - \frac{5}{v}\right)^{1,2}} \quad (7)$$

Результаты расчетов представлены в таблице 4.

Таблица 4

Значения токов и напряжений ВГ при использовании системы ТП–Д

$v$	11	13	23	25
$I_{v*}$	0,059	0,048	0,023	0,021
$I_v$ , кА	0,046	0,037	0,017	0,016
$U_{v\phi}$ , кВ	0,22	0,1	0,05	0,02

Согласно полученным результатам коэффициент искажения синусоидальности напряжения  $K_U$  составляет 4,2%. Следовательно, несмотря на некоторое увеличение коэффициента  $K_U$  в сети с системой ТП–Д по отношению к соответствующему коэффициенту в сети с Г–Д, значение  $K_U$  соответствует нормально допустимому значению. Однако при замене системы Г–Д на ТП–Д возникает вопрос о компенсации реактивной мощности. В системе Г–Д этот вопрос решался с помощью приводного синхронного двигателя. В системе ТП–Д, потребление реактивной мощности обусловлено в основном двумя причинами: естественным коммутационным процессом и искусственной задержкой момента открытия вентиля в целях регулирования выпрямленного напряжения. Именно эти факторы создают сдвиг по фазе вектора тока в цепях вентилей относительно напряжения, понижают коэффициент мощности в сетях, питающих выпрямители, и повышают потребление реактивной мощности.

Уменьшения реактивной мощности, потребляемой преобразователем, достигается использованием фильтрокомпенсирующих устройств или регулированием напряжения на стороне переменного тока.

Рассмотрим применение системы асинхронный двигатель – преобразователь частоты. НПЧ состоит из 3-х блоков, структурная схема одного из блоков представлена на рисунке 5. На каждую клеть устанавливается система НПЧ–АД мощностью 15МВА. ПЧ представляют собой статические аппараты, содержащие устройства силовой электроники и являющиеся источниками высших гармоник и интергармоник во входных цепях. Входным устройством преобразователя в общем случае является выпрямитель, поэтому входной ток оказывается несинусоидальным (что вызывает несинусоидальность напряжения на шинах, от которых преобразователь частоты получает питание). Выходные параметры преобразователя формируются инвертором, который обеспечивает выходное напряжение необходимой частоты и величины за счет регулирования длительности импульсов высокой частоты (до 20 кГц). Это означает, что выходное напряжение преобразователя также несинусоидальное, и к тому же в выходных силовых цепях преобразователя протекают токи, содержащие высокочастотные составляющие, оказывающие негативное влияние на приборы и устройства других систем, расположенные в непосредственной близости от преобразователя.

Основные достоинства НПЧ:

- высокий КПД до 0,9;
- возможность двухстороннего обмена между питающей сетью и двигателем, что обеспечивает как двигательные, так и тормозные режимы ЭП;
- возможность получения сколь угодно низких частот выходного напряжения преобразователя и обеспечения равномерного вращения двигателя на малых скоростях;

К недостаткам НПЧ можно отнести:

- ограничение максимальных значений выходной частоты на уровне порядка 1/3...2/3 от частоты питающей сети;

- наличие интергармоник и постоянных составляющих выходного напряжения и тока при неблагоприятных соотношениях частот на входе и выходе ПЧ;
- низкий коэффициент мощности, несинусоидальность и модуляция входных токов ПЧ. Невысокие показатели электромагнитной совместимости с питающей сетью [5].

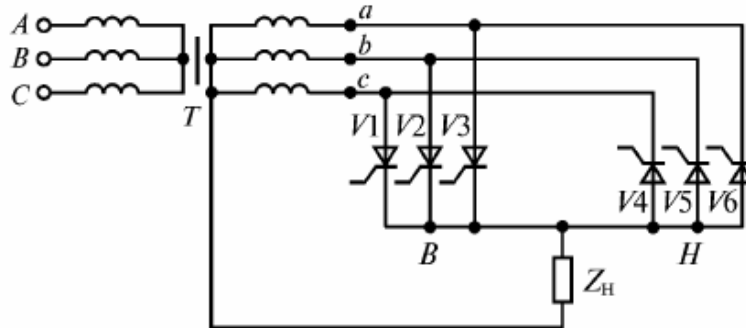


Рис. 5 – Структурная схема блока трехфазно- однофазного НПЧ

В общем случае выходные напряжения и входные токи НПЧ могут быть найдены из матричных выражений:

$$\begin{aligned} U_{\text{вых}}(t) &= H(t)U_{\text{вх}}, \\ i_{\text{вх}}(t) &= H(t)^T i_{\text{вых}}, \end{aligned} \quad (8)$$

где  $U_{\text{вх}}(t)$ ,  $U_{\text{вых}}(t)$ ,  $i_{\text{вх}}(t)$ ,  $i_{\text{вых}}(t)$  – матрицы-столбцы входных и выходных напряжений и токов соответственно;

$H(t)$  – матрица переключающих функций;

$H(t)^T$  – транспонированная матрица переключающих функций.

Форма кривых выходного напряжения (входного тока) НПЧ, а также их спектральный состав существенно зависят от вида модулирующей функции. Согласно [6] могут использоваться следующие функции:

линейная  $M(t) = \omega_{\text{вых}} t + \psi$  ;

синусоидальная  $M(t) = \mu \sin(\omega_{\text{вых}} t + \psi)$  ;

треугольная  $M(t) = \arcsin[\mu \sin(\omega_{\text{вых}} t + \psi)]$  ;

прямоугольная  $M(t) = \begin{cases} \frac{\pi - \psi}{2} \leq \omega_{\text{вых}} t < \pi - \psi \\ -\frac{\pi}{2} - \psi \omega_{\text{вых}} t < 2\pi\psi \end{cases}$  ;

где  $M(t)$  – модулирующая функция;

$\mu$  – глубина регулирования выходного напряжения;

$\psi$  – произвольный фазовый угол.

Получить спектральный состав входного тока преобразователя частоты возможно экспериментальным путем или с помощью анализа кривой входного тока, полученного путем моделирования. Спектр выходного напряжения НПЧ с синусоидальным законом управления получен путем моделирования в среде MATLAB [7]. Исходные данные для моделирования: напряжение питания, отношения частоты коммутации к выходной частоте, коэффициент модуляции, нагрузка, модулирующая функция, задание числа отсчетов на периоде повторения и определение шага дискретизации.

Расчетная схема замещения для расчета коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения примет такой же вид, как и при системе ТП-Д (рис 4, б). Результаты расче-



тов представлены в таблице 5.

По результатам расчета коэффициент искажения синусоидальности напряжения составляет 10,5 %, что превышает нормально и предельно допустимые значения.

Все расчеты коэффициента искажения синусоидальности напряжения сведены в таблицу 6.

Таблица 5

Значения токов и напряжений ВГ при использовании системы НПЧ-Д

$\nu$	5	7	11	13
$I_{\nu}$ , кА	0,136	0,107	0,092	0,071
$U_{\nu\phi}$ , кВ	0,44	0,29	0,21	0,17

Таблица 6

Результаты расчетов

Система электропривода	Коэффициент искажения синусоидальности напряжения $K_U$ , %	Нормально допустимое значение в соответствии с ГОСТ 13109-97, %
Г-Д	3,1	5
ТП-Д	4,2	5
НПЧ-АД	10,5	5

### Выводы

1. С точки зрения уровней коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения при системе Г-Д и ТП-Д он находится в пределах, установленных ГОСТ 13109-97.
2. При замене системы Г-Д на НПЧ необходимы затраты на средства компенсации высших гармоник, поскольку НПЧ является источником не только высших гармоник, но и интергармоник.
3. Оптимальным вариантом является замена системы Г-Д на систему ТП-Д. Применение этой системы позволит увеличить количества производимого проката, снизить удельные эксплуатационные расходы, благодаря полной автоматизации производственного процесса [8]. Эта система также дает возможность значительно улучшить качество проката, а, следовательно, повысить прибыль производства, делает возможной быструю смену сортамента, т.е. позволит гибко реагировать на запросы заказчиков.

### Список использованных источников:

1. Грудев А.П. Технология прокатного производства / А.П. Грудев, Л.Ф. Машкин, М.И. Ханин – М.: Металлургия, 1994. – 656с.
2. ГОСТ 13109- 97. Электрическая энергия. Требования к качеству электрической энергии в электрических сетях общего назначения. К., 1999. – 30с.
3. Жежеленко И.В. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях / И.В. Жежеленко, Ю.Л. Саенко – М.: Энергоатомиздат, 2005. – 262с.
4. Башарин А.В. Управление электроприводами / А.В. Башарин, В.А.Новиков – Л. : Энергоиздат, 1982. – 392с.
5. Ключев В.И. Теория электропривода / В.И.Ключев – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704с.
6. Кочкин В.И. Управляемые статические устройства компенсации реактивной мощности для линий электропередачи / В.И. Кочкин // Электричество. – 2000. – №9. – С.13-19.
7. Тарасевич Ю.Ф. Литейно-прокатные агрегаты воздействуют на структуру производства и рынок тонколистовой стали / Ю.Ф. Тарасевич, С.П. Ефименко, В.С. Юсупов // Производство проката. – 2000. – № 5. – С. 33-42.
8. Чаплыгин Е.Е. Анализ искажений выходного напряжения и сетевого тока матричного преобразователя частоты. / Е.Е. Чаплыгин // Электричество. – 2000. – №11. – С. 25–38.

**Bibliography:**

1. A.P. Grudev Technology rolling mills / A.P. Grudev, L.F. Mashkin, M.I. Hanin – Moscow, Metallurgy, 1994. – 656p. (Rus.)
2. GOST 13109 – 97. Electrical energy. Requirements for the quality of electric power in networks of general purpose. K. 1999. – 30p. (Rus.)
3. I.V.Zhezhelenko Power quality in the industry / I.V. Zhezhelenko, Y.L. Saenko – Energoatomizdat, Moscow, 2005. – 262p. (Rus.)
4. A.V. Basharin Control of electrical / A.V. Basharin, V.A. Novikov – L. Energoizdat, 1982. – 392p. (Rus.)
5. V.I. Klyuchev Theory of electric / V.I. Klyuchev –Energoatomizdat, Moscow, 2001. – 704p. (Rus.)
6. V.I. Kochkin Controlled static reactive power compensation devices for power lines / V.I. Kochkin // Electricity. – 2000. – № 9. – P.13–19. (Rus.)
7. Y.F. Tarasevich Casting and rolling units affect the structure of production and market steel sheets / Y.F. Tarasevich, S.P. Efimenko, V.S. Yusupov // Rolled. – 2000. – № 5. – P. 33–42. (Rus.)
8. E.E. Chaplygin Analysis of the distortion of output voltage and line current matrix drive. / E.E. Chaplygin // Electricity. – 2000. – № 11. – P. 25-38. (Rus.)

Рецензент: И.В. Жежеленко  
д-р техн. наук, проф. ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 14.11.2012