

14. **Кондратець В.О.** Теоретичне дослідження розрідження пісків односпірального класифікатора джерелом з незмінною витратою води / **В.О. Кондратець, О.М. Сербул** // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: зб. наук. праць КНТУ.- 2013.- Вип. 26.- С. 173-180.

15. Пат. 90851 Україна, МКВ 7 В 03 В 11/00, В 02 С 25/00. Спосіб автоматичної стабілізації розрідження пульпи в млинах з циркулюючим навантаженням /**Кондратець В.О.**; заявник і патентовласник Кіровоградський національний технічний університет. – №u201400514; заявл. 20.01.14; опубл. 10.06.14, Бюл. № 11.

16. **Morkun V.S, Morkun N.V, Pikilnyak A.V.** (2014). Ultrasonic phased array parameters determination for the gas bubble size distribution control formation in the iron ore flotation, Metallurgical and Mining Industry, No3, p.p. 28-31.

17. **Morkun V.S, Morkun N.V, Pikilnyak A.V.** (2014). The gas bubble size distribution control formation in the flotation process, Metallurgical and Mining Industry, No4, p.p. 42-45.

18. **Моркун В.С.** Контроль гранулометрического состава железорудной пульпы на базе комбинированного использования объемных ультразвуковых волн и волн Лява /**В.С. Моркун, О.В. Поркуян** // Вісник Криворізького технічного університету: зб. наук. праць.- 2007.- Вип.17.- С.224-230.

19. **Гуленко Т.И.** Исследование стержневого датчика с пьезокерамическим преобразователем / **Т.И. Гуленко, В.А. Кондратец, В.И. Лопатин** // Контрольно-измерительная техника: респ. межвед. научн.-техн. сборник.- 1972.- Вып.12.- С.93-99.

Рукопис подано до редакції 18.04.16

УДК 621.3.011.712: 621.3.014.8

А.И. САВИЦКИЙ, А.Б. СЁМОЧКИН, С.В. СЁМОЧКИНА, кандидаты техн. наук, доц.,
Криворожский национальный университет

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ КЛЕТЕЙ ПРОКАТНЫХ СТАНОВ

В данной статье проводится анализ коэффициента мощности, гармонического состава тока и напряжения, а также оценка их уровней на основе стандарта IEEE 519-1992. Целью работы является определение необходимости мониторинга параметров качества электрической сети и точек замеров в промышленных условиях за счет внедрения сетевых систем дистанционного сбора информации. Указаны последствия несоответствия реальных значений требуемым стандартам. Моделирование электроэнергетической системы выполнено в программной среде Matlab. Проводились исследования энергетических показателей для 12-пульсной и 6-пульсной схем нереверсивного тиристорного привода при управлении отдельной клетью прокатного стана. Рассмотрен случай управления прокатной линией из 21 клетки, при одинаковом угле отпирания для всех тиристоров и при согласованном управлении с помощью сдвига между углами отпирания тиристорных преобразователей для соседних клеток прокатного стана. Даны рекомендации по выбору значений углов управления, с учетом необходимости соблюдения технологических ограничений (согласование скоростей клеток). Кроме этого результаты работы будут положены в ряд мероприятий по эффективному фазовому управлению распределенными силовыми преобразователями прокатных приводов по промышленной информационной сети. Отмечена целесообразность применения методов нечеткой логики для согласованного энергоэффективного управления отдельными электроприводами.

Ключевые слова: тиристорный электропривод, прокатный стан, энергетические показатели, коэффициент искажения, промышленная информационная сеть

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Сети питания крупных промышленных цехов, включающих прокатные станы, в настоящее время характеризуются повышенным потреблением реактивной мощности и гармоническими составляющими напряжения и тока, образуемых силовым оборудованием с полупроводниками. Это ведет к определенным вредным последствиям в зависимости от прикладной области:

возникновение пиковых перенапряжений, перегрузок, что может вызвать отключение от сети;

увеличение действующих значений тока и напряжения ведет к увеличению потерь;

увеличение частоты в спектре тока приводит к механическим, тепловым нагрузкам и уменьшает жизненный цикл оборудования электрических систем, производит нагрев трансформаторов, кабелей, электродвигателей [1-3];

увеличиваются затраты реактивной мощности;

появляется мерцание освещения;

увеличивается количество сбоев в работе защиты сети; чаще происходят сбои в работе электронного точного оборудования и информационной сети [4].

В условиях непрерывного производства выполнять многократные эксперименты по управлению преобразователями практически, при прокатке, не возможно и экономически не оправдано.

Поэтому работа, направленная на оценку существующего уровня гармоник в электросети с помощью модели электроэнергетической системы, а затем в режиме реального времени, и разработку мероприятий для сохранения уровней этого искажения в пределах установленного диапазона согласно стандарта IEEE 519-1992, весьма актуальна.

Анализ исследований и публикаций. Моделированием на ЭВМ радиоэлектронных устройств занимались довольно давно [5].

Это позволяло определять наиболее приемлемые параметры электронных систем варьированием разных составляющих и самой конфигурации схем.

Анализ процессов сетей с тиристорами и компенсаторами реактивной мощности производился в сочетании метода макро моделирования [6] с модификациями итерационных методов решения нелинейных уравнений.

Как известно, одной из основных проблем при использовании преобразователей AC-DC является их электромагнитная совместимость (ЭМС) с сетью питания.

В последние годы наметилась тенденция комплексного подхода к созданию более совершенных топологий мощных выпрямителей и их систем управления для улучшения ЭМС преобразователей с питающей сетью.

Это позволяет одновременно решить несколько задач:

улучшить энергетические показатели системы (коэффициента мощности, к.п.д.);

уменьшить содержание высших гармоник входного тока преобразователя;

улучшить массогабаритные показатели преобразователей.

Перспективным является использование преобразователей на основе компенсированных управляемых выпрямителей (КУВ), несмотря на усложнение силового оборудования и сложность построения систем управления [7].

Для данного случая улучшение массогабаритных показателей преобразователей не столь важно, так как идет речь о модернизации систем контроля и управления.

Постановка задачи. На металлургических предприятиях в прокатных цехах имеется непрерывная прокатная линия, которая включает в себя несколько клетей, например, 21 прокатную клеть, схема которой показана на рис. 1.

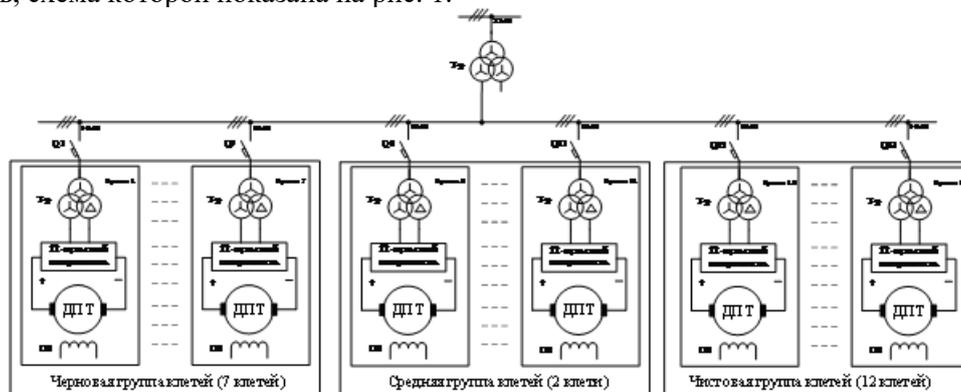


Рис. 1. Схема электроснабжения прокатной линии

К энергетическим показателям, которым уделяется внимание в данной статье, относятся коэффициент мощности и коэффициент нелинейных искажений для кривых тока и напряжения.

Проведено исследование этих показателей применительно к 12- и 6-пульсной схемам нереверсивного тиристорного привода.

Изложение материала и результаты. Анализ основных режимов работы осуществлялся с помощью моделирования в программной среде MATLAB.

Ниже представлены структурные схемы моделей для исследования энергетических показателей.

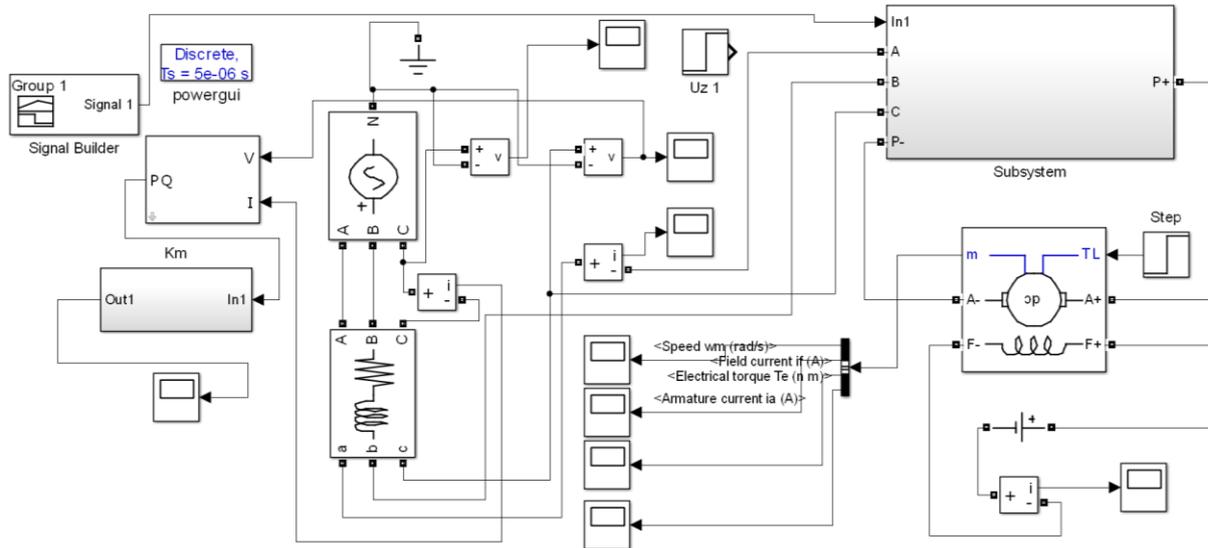


Рис. 2. Общая структура модели Матлаб для обеих 6-ти и 12-ти пульсных схем выпрямления

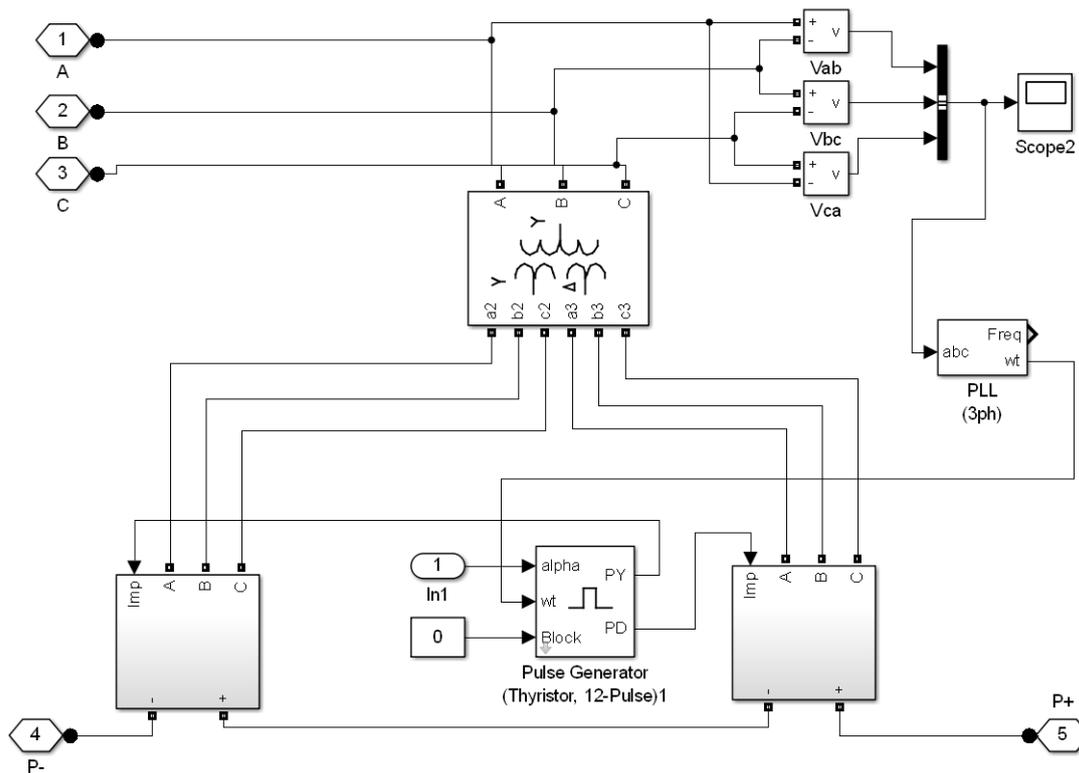


Рис. 3. Структура блока Subsystem для 12-пульсной схемы выпрямления

Структура блока Subsystem для 6-пульсной схемы выпрямления получается из структуры рис. 3, если исключить один мостовой выпрямитель (например, в правом нижнем углу) и заменить трехобмоточный трансформатор на двухобмоточный с аналогичными параметрами (за исключением увеличенного в 2 раза коэффициента трансформации).

Моделирование осуществлялось поэтапно, при следующих условиях: 1) пуск на полностью открытые выпрямители с моментом нагрузки 5000 Н·м, 2) на 0,5 сек осуществляется наброс полной нагрузки 15000 Н·м, 3) на 0,8 сек осуществлялось плавное снижение угла отпирания с 0 до 70 эл. град. С помощью быстрого преобразования Фурье (FFT (Fast Fourier Transform) из инструментария Matlab) были проанализированы графики первичных токов и напряжений трансформаторов на предмет искажений формы и появления сдвига фаз между ними (определяется отдельно, с помощью блоков PQ и Km). На рис. 4 представлены результаты моделирования коэффициента мощности для 6-пульсной и 12-пульсной схем выпрямления.

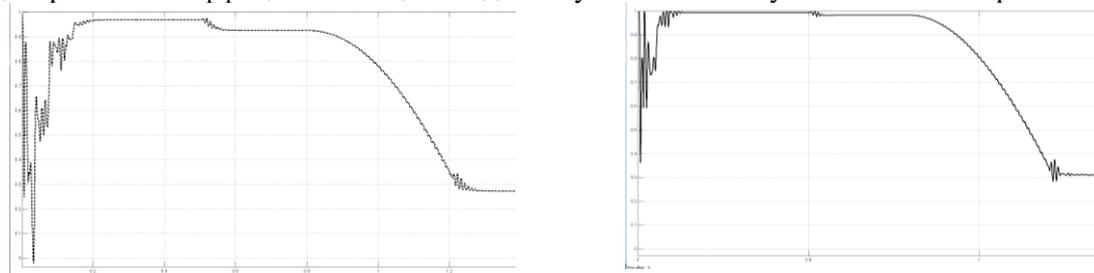


Рис. 4. Коэффициент мощности в 6-пульсной и 12-пульсной схемах питания ТП-Д (тиристорный преобразователь-двигатель)

Расчеты показывают, что при максимальном угле управления тиристорами и нагрузке 5000 Н·м коэффициент мощности 6-пульсной схемы составляет 0,969, при увеличении нагрузки до 15000 Н·м при том же угле он падает до 0,926, а при угле отпирания 70 эл. град. - до 0,272.

При питании МПТ от 12-пульсной схемы коэффициент мощности несколько улучшается, при прочих равных условиях: соответственно 0,994, 0,983 и 0,311.

Последующий анализ гармонического состава для токов и напряжений первичной обмотки трансформатора был произведен для интервала времени от 0,2 до 0,5 с (угол отпирания 0 эл. град., нагрузка 5000Н·м), от 0,6 до 0,8 с (тот же угол отпирания 0 эл. град., но в три раза увеличенный момент 15000Н·м), от 1,25 до 1,45 с (увеличенный до 70 эл. град. угол при полном моменте нагрузки 15000 Н·м). Результаты анализа были сведены в табл. 1.

Таблица 1

Гармонический состав токов и напряжений

Тип схемы	12-пульсная						6-пульсная						
	0 эл.град.			70 эл.град.			0 эл.град.			70 эл.град.			
	5000 Нм		15000 Нм	15000 Нм			5000 Нм		15000 Нм		15000 Нм		
Коэффициент искажений, %	THD _U	THD _I											
	1,17	11,88	1,99	9,63	5,24	14,89	0,94	26,94	1,82	18,98	3,36	29,56	
Амплитуды, % от первой	5-я	0,01	0,48	0,05	0,68	0,02	0,24	0,64	24,47	1,33	17,02	2,19	27,46
	7-я	0,01	0,24	0,05	0,45	0,00	0,02	0,30	8,28	0,84	7,68	0,54	4,75
	11-я	0,52	9,31	1,28	7,64	2,10	12,37	0,34	5,85	0,40	2,33	1,33	7,57
	13-я	0,39	5,94	1,06	5,37	0,81	4,02	0,26	3,75	0,34	1,69	0,75	3,59

Анализ коэффициентов табл. 1 показывает, что во всех рассматриваемых режимах THD_U в 6-пульсной схеме всегда лучше, чем в 12-пульсной. И наоборот, THD_I в 6-пульсной схеме всегда хуже, чем в 12-пульсной. Далее, амплитуды 5-й и 7-й гармоник напряжения и тока действительно практически подавляются (уменьшаются в несколько десятков раз) в 12-пульсной схеме, по сравнению с 6-пульсной. То же самое можно сказать и о 11, 13 гармониках тока – они в 12-пульсной схеме значительно ниже, чем в 6-пульсной. А вот 11, 13 гармоники напряжения в 12-пульсной схеме наоборот, увеличиваются по сравнению с 6-пульсной схемой.

Для дальнейшего развития исследования энергетических показателей особый интерес представляет собой моделирование гармонического состава напряжений и токов в системе из 21-й прокатной клетки (рис. 1). Модель этой системы приведена на рис. 5.

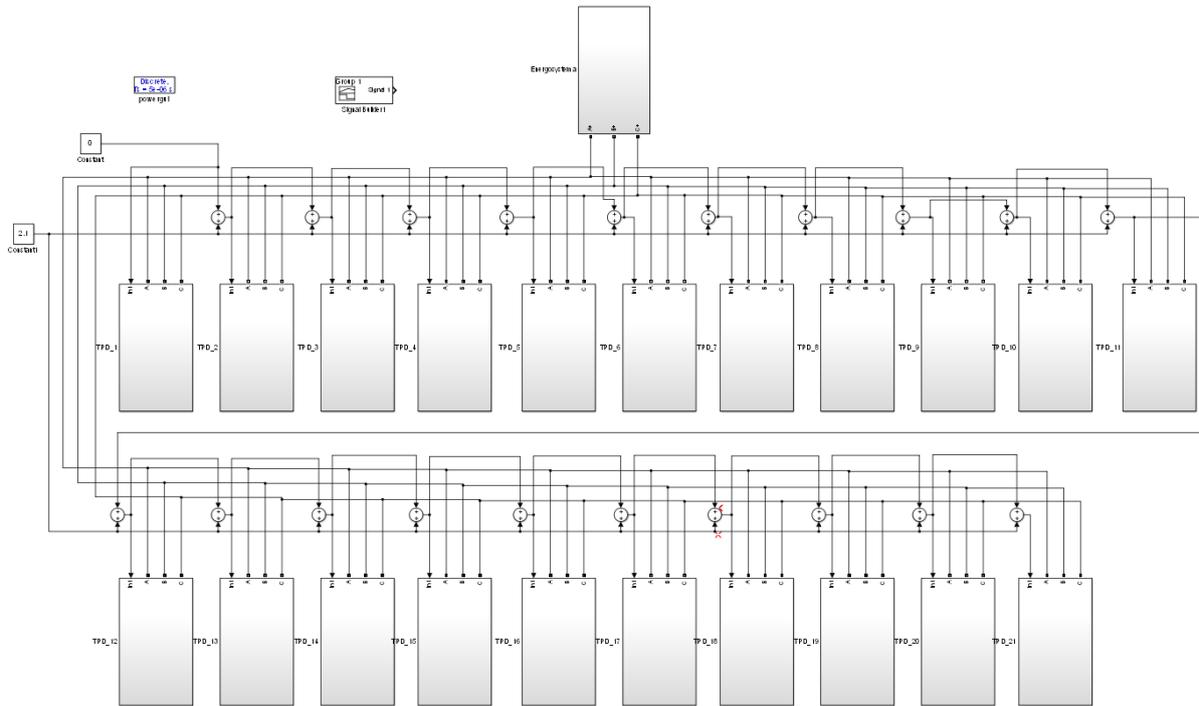


Рис. 5. Модель системы из 21-й прокатной клетки

В этой модели в блоках TPD_1÷ TPD_21 реализованы модели электроприводов, аналогичные рис. 2,3, в блоке Energosystema - трансформатор 32 МВА с кабельной линией, ведущей к прокатным клетям, со средствами измерения энергетических показателей. В усилителях реализованы коэффициенты сдвига углов управления между соседними клетями прокатного стана. Моделированием установлено, что если сдвиг углов между соседними углами управления составляет 3 эл. град. (для самой быстрой клетки угол - 5 эл. град., для самой медленной - почти 70 эл. град.), получаются неплохие показатели [8], соответствующие IEEE Standard 519-2014: THDu = 1,25% при амплитуде первой гармоники 7806 В, и THDi = 0,92% при амплитуде первой гармоники 1049 А.

Для сравнения приведены аналогичные параметры для одинаковых углов управления 5 эл. град. для всех 21 прокатных клеток: THDu = 3,23% при амплитуде первой гармоники 7656 В, и THDi = 10,47% при амплитуде первой гармоники 1047 А. Детальные результаты моделирования обоих вариантов для удобства сравнения сведены в табл. 2.

Таблица 2

Сравнительный анализ для разных и одинаковых углов управления отдельными клетями

Результаты моделирования при углах управления 5, 8, 11, ... 68 эл. град. соответственно для 1-й, 2-й, 3-й, ... 21-й прокатных клеток

Результаты моделирования при углах управления 5 эл. град. для всех 21 прокатных клеток

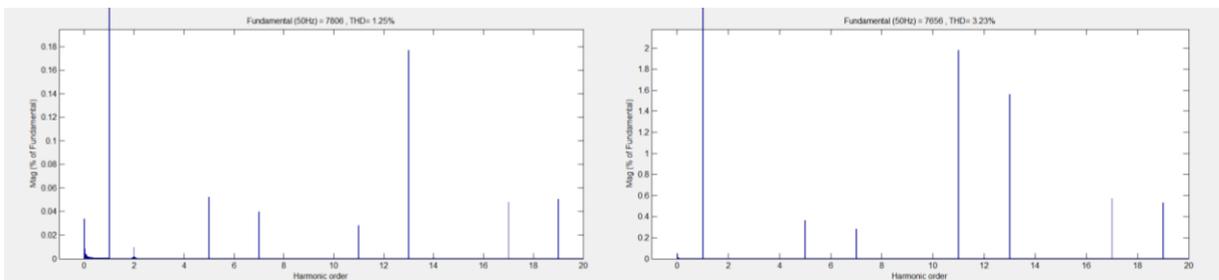


Рис. 6. Спектральный состав напряжения на шинах проката

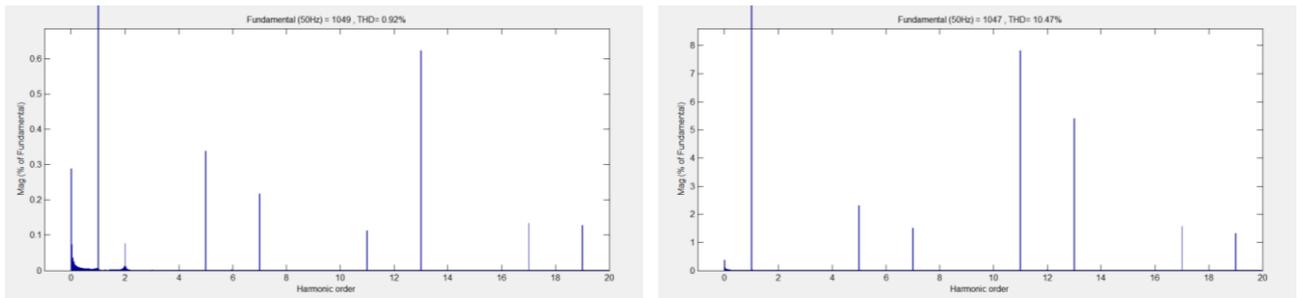


Рис. 7. Спектральный состав первичного тока трансформатора 32 МВА

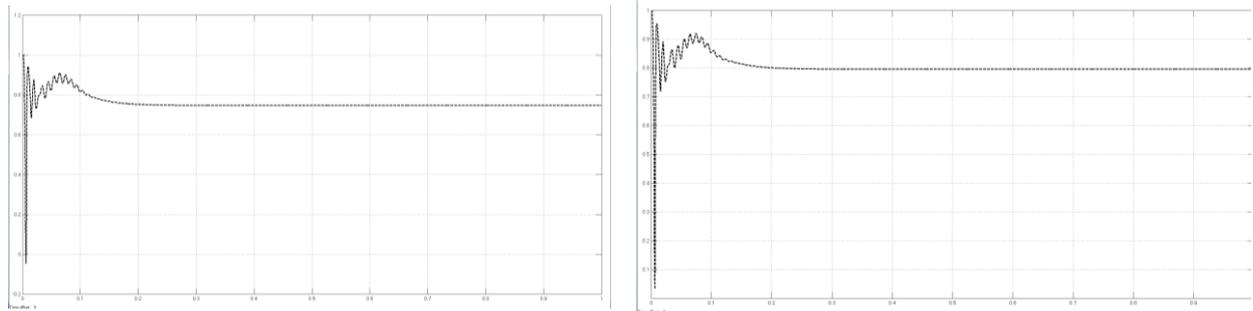


Рис. 8. Коэффициент мощности (0,75 и 0,795 соответственно)

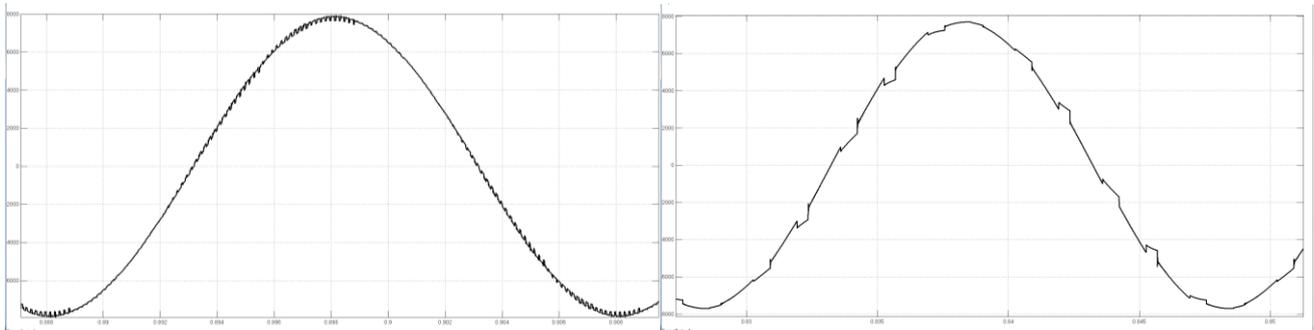


Рис. 9. График напряжения на шинах проката

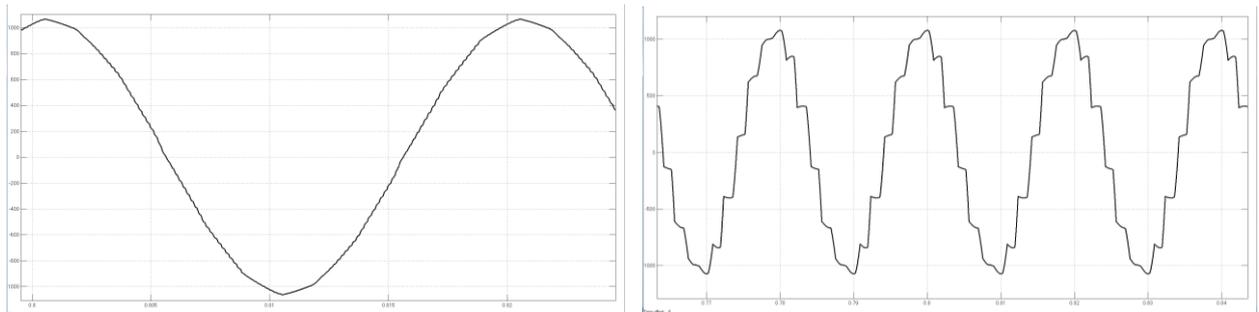


Рис. 10. График первичного тока трансформатора 32 МВА

Выводы и направление дальнейших исследований. В непрерывном прокате каждая последующая клетка работает со все более и более высокой скоростью. Результаты моделирования указывают на то, что можно в рамках ограничений технологических карт управлять углом управления в электроприводе каждой клетки с тем, чтобы улучшать гармонический состав напряжений и токов. К сожалению, глубокое регулирование скорости систем ТП-Д также приводит к заметному снижению коэффициента мощности. Поэтому в дальнейшем следует определиться, в пользу улучшения какого энергетического параметра (коэффициента гармоник или коэффициента мощности) следует отдать предпочтение, или же, определить наиболее экономичный режим работы системы приводов с учетом обоих этих ограничений. Все это, и учет технологических требований к распределению скорости, а значит

и углов управления отдельных приводов, требует более сложных алгоритмов управления фильтрами [8] сети в целом с нечеткой [9] логикой.

Список литературы

1. IEEE Standard 519-1992 Application in Industrial Power Distribution Networks with a New Monitoring Approach **João Pedro Trovão, Paulo Pereirinha, Humberto Jorge**, Proceeding of the 6th WSEAS International Conference on Power Systems, Lisbon, Portugal, September 22-24, 2006 244-249 pp.
2. **W. Mack Grady**, The University of Texas at Austin Robert J. Gilleskie, San Diego Gas & Electric Harmonics and how they relate to power factor. Proc. of the EPRI Power Quality Issues & Opportunities Conference (PQA'93), San Diego, CA, November 1993.
3. **Dugan R., Mcgranaghan M., Wayne H.**, 1999, Electrical Power Systems Quality, 265 pp., McGraw-Hill, NewYork, USA.
4. **Trovão J.P.**, Harmonic Distortion Monitoring and Analysis Integrated System a Systematic Approach for the Industrial Sector M.Sc Thesis, Faculty of Science and Technology of the University of Coimbra, Portugal, 2004.
5. Моделирование и оптимизация на ЭВМ радиоэлектронных устройств. **Под ред. З.М.Бененсона**. – М. Радио и связь, 1981, 272с.
6. **Ягуп В.Г.** Построение и использование макромоделей автономных тиристорных преобразователей. – Изв. АНСССР. Энергетика и транспорт 1983, №4, с.78-83.
7. **Сокол Е.И., Бутова О.А., Шишкин М.А.**, НТУ «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, Украина, Matlab-модель 12-ти пульсного параллельного КУВ с разделенным управлением. Системы управления и контроля преобразователями электроэнергетики № 9 (128) сентябрь 2014, спец. выпуск, Том 2, Энергосбережение • Энергетика • Энергоаудит.
8. Расчет параметров универсального фильтра высших гармоник для систем с многопульсными выпрямителями. **И.В.Волков, Д.П.Каршенов, С.В.Подольный**, Техн. электродинамика. 2014. № 2, С.17-21
9. **Усков А.А.** Принципы построения систем управления с нечеткой логикой // Приборы и системы. Управление, Контроль, Диагностика. 2004. № 6. С. 7-13.

Рукопись поступила в редакцию 17.04.16

УДК 681.3

Ю.Г. ОСАДЧУК, канд. техн. наук, доц., І.А. КОЗАКЕВИЧ, ст. викладач,
Р.А. ІЛЬЧЕНКО, студент, Криворізький національний університет

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ АСИНХРОННИХ, СИНХРОННИХ МАШИН З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ ТА ВЕНТИЛЬНИХ РЕАКТИВНИХ ДВИГУНІВ ДЛЯ ГІБРИДНИХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

Внаслідок підвищеної енергетичної ефективності та низького значення показника вартість/шлях, електричні та гібридні транспортні засоби привертають до себе все більшу увагу. Для задоволення вимог щодо електроприводу двигуни цих механізмів повинні задовольняти специфічні вимоги щодо продуктивності та ефективності. Це призводить до необхідності відпрацювання чітких критеріїв вибору електричних двигунів. У роботі виконано розробку критеріїв порівняння, що можуть бути використані при аналізі синхронних двигунів з постійними магнітами з розподіленими обмотками та зосередженими обмотками, асинхронних двигунів та вентильних реактивних двигунів для електричних та гібридних транспортних засобів. Для проектування конструкції асинхронного двигуна використовувався метод кінцевих елементів. Для урахування нелінійних параметрів машини та досягнення високого рівня ефективності двигунів, оптимальні траєкторії струму отримані для розширеної моделі синхронних двигунів з постійними магнітами та асинхронних. Додаткові критерії порівняння з урахуванням показників шуму та вібрацій також враховано при узагальненому аналізі.

Ключові слова: гібридні транспортні засоби, електромеханічна система, вентильний реактивний двигун, асинхронний двигун, синхронний двигун з постійними магнітами, коефіцієнт корисної дії, струм статора

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Інтенсивне впровадження електромеханічних тягових систем призводить до необхідності відпрацювання чітких критеріїв вибору електричних двигунів. В даний час, окрім широко використовуваних у гібридних транспортних засобах синхронних двигунів з постійними магнітами, все більше поширення отримують нові типи електричних машин, серед яких найбільш популярними є вентильні реактивні двигуни. Тому розробка та дослідження нових електромеханічних систем з асинхронними, синхронними та вентильними двигунами є актуальною й важливою науково-технічною задачею.