

От редакции

Научная школа института энергетики и автоматизированных систем МГТУ в рамках специальности 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы» основана заслуженным деятелем науки РФ, академиком Российской Академии инженерных наук, д-ром техн. наук, проф. Игорем Андреевичем Селивановым. Основными направлениями исследований являются совершенствование автоматизированных электроприводов агрегатов металлургического производства, энергосбережение и разработка систем диагностирования технического состояния силового электротехнического и энергетического оборудования. Его учениками – известными учеными, которые продолжают эффективные научные исследования в этих направлениях, являются профессор Лукьянов С.И., Карандаев А.С., Корнилов Г.П., Сарваров А.С., Мугалимов Р.Г., Радионов А.А., Омельченко Е.Я., доценты Евдокимов С.А., Петушков М.Ю., Храмшин В.Р., Храмшин Т.Р., Николаев А.А., Малафеев А.В. и др. Магнитогорская школа «электроприводчиков» широко известна в России. Тесные научные и практические связи поддерживаются с промышленными предприятиями и фирмами: ОАО «ММК», ОАО «ММК-МЕТИЗ», ОАО «БМК» группы «МЕЧЕЛ», ООО «Руэлпром», ООО «Димрус», ЗАО «ММК-Metalurji» (Турция), с учеными НИУ «МЭИ», ЮУрГУ, УрФУ. Более 10 лет активно работает диссертационный совет по указанной научной специальности, в котором успешно защищаются докторские и кандидатские диссертации сотрудников МГТУ, ММК, коллег из других вузов и с промышленных предприятий. Направления исследований расширяются, а коллектив научной школы пополняется талантливой, перспективной молодежью.

УДК 621.311+621.34.001

РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ*

Лукьянов С.И., Карандаев А.С., Евдокимов С.А., Сарваров А.С., Петушков М.Ю., Храмшин В.Р.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Россия

Аннотация. Отмечено, что одним из главных направлений исследований научных групп института энергетики и автоматики Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова (МГТУ) является разработка систем непрерывного контроля и диагностирования технического состояния электрооборудования агрегатов металлургического производства. Рассмотрены принцип диагностирования технологических дефектов слывовых машин непрерывного литья заготовки (МНЛЗ), основанный на анализе характеристик теплообменных процессов между рабочей поверхностью стенок кристаллизатора и слитком, и метод диагностирования оборудования по изменению токов нагрузки электродвигателей. Приведена функциональная схема системы непрерывного контроля технического состояния трансформаторов сверхмощных дуговых сталеплавильных печей, внедренной в электросталеплавильном цехе (ЭСЦ) ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ОАО «ММК»). Рассмотрен аппаратный состав системы мониторинга технического состояния асинхронных двигателей групповых электроприводов секций рольгангов стана 5000. Представлен метод диагностирования технического состояния асинхронных двигателей по обобщенному вектору тока в пусковых режимах. Выполнен сравнительный анализ спектрограм экспериментально измеренных токов, обосновано применение непрерывного вейвлет-преобразования обобщенного вектора тока.

Ключевые слова: металлургическое предприятие, машина непрерывного литья заготовок, электростанция, электродуговая печь, силовой трансформатор, толстолистовой стан горячей прокатки, рольганг, регулируемый электропривод, асинхронный двигатель, техническое состояние, мониторинг, системы, методики, внедрение

Введение

Разработка систем непрерывного контроля технического состояния электрооборудования является одним из основных направлений научной школы «Создание энергосберегающих систем транспортировки, распределения и потребления тепловой и электрической энергии на промышленных предприятиях». Это объясняется тем, что проблемы энерго-, ресурсосбережения и диагностирования технического состояния оборудования энергоёмких объектов металлургических предприятий неразрывно связаны. Аварийные остановки энергоагрегатов собственных электростан-

ций и агрегатов, обеспечивающих непрерывный технологический процесс, зачастую ведут к многомиллионным убыткам, а в ряде случаев – к необратимым последствиям. В этой связи на передний план выходят задачи непрерывного контроля и диагностирования состояния трансформаторов дуговых сталеплавильных печей, повышающих (блочных) трансформаторов собственных электростанций и понижающих (сетевых) трансформаторов подстанций.

Не менее важной задачей является контроль технического состояния электрооборудования объектов горнорудного производства, механизмов МНЛЗ и прокатных станов. К нему, прежде всего, относятся главные электроприводы клетей, регулируемые и нерегулируемые электроприводы рольгангов, намоточно-размоточных устройств станов горячей и холодной

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (гос. задание №2014/80).

прокатки, тянуще-правильных устройств МНЛЗ, насосов, мощных вентиляторов, мельниц, дробилок и т.д. Ниже приводится информация о результатах научных исследований, выполненных научными группами в названном направлении.

Диагностирование технологических дефектов слябовых машин непрерывного литья заготовки (научный руководитель – д-р техн. наук, профессор Лукьянов С.И.).

Научный коллектив кафедры электроники и микроэлектроники МГТУ за последнее десятилетие разработал и внедрил более десяти систем диагностирования оборудования металлургических агрегатов и мониторинга технологических процессов в сталеплавильном и прокатном производствах [1-3]. Ниже кратко представлены результаты разработки и внедрения систем диагностирования технологических дефектов на слябовых машинах непрерывного литья заготовки.

Прорыв корки слитка по причине приваривания (зависания) её участка к стенкам кристаллизатора является одной из распространенных и тяжелых аварий. С целью раннего детектирования зависания корочки слитка в кристаллизаторе на современных МНЛЗ применяют интеллектуальные информационные системы, основанные на непрерывном анализе технологических параметров непрерывной разливки. Широкое распространение получили *системы, основанные на анализе характеристик теплообменных процессов* между рабочей поверхностью стенок кристаллизатора и слитком, измеренных при помощи термопар, встроенных в кристаллизатор [4].

Встройка термопар (96-108 ед.) в кристаллизатор (рис. 1, а) выполняется равномерно, в три слоя по периметру кристаллизатора. С целью получения достоверной и качественной картины процесса теплообмена между слитком и медными стенками кристаллизатора разработана математическая модель распределения температур участков стенок кристаллизатора, основанная на первичной триангуляции двумерного пространства координатной сетки с последующим построением интерполированных значений температуры по всему полю кристаллизатора [5].

На рис. 1, б приведены временные диаграммы изменения значений температур T_j , поступающих в систему предупреждения прорыва корочки слитка от термопар при зависании корочки слитка в районе 40-й термопары (рис. 1, а). Согласно рис. 1, б зависание корочки слитка (момент времени t_1) в районе установки термопары №40 приводит к росту значений температуры T_{40} , вызванному выплеском жидкой стали на медные стенки в результате локального разрыва корочки слитка. После достижения температурой опре-

делённой экстремальной величины наблюдается её снижение ниже значения, соответствующего нормальному режиму охлаждения металла в кристаллизаторе. Это свидетельствует об увеличении толщины корочки слитка в данной локальной области (зависании корочки слитка). Кроме того, наблюдается аналогичное изменение значений температур на смежных термопарах №41 и 77, отличающееся тем, что повышение температуры участка медной стенки с последующим снижением сдвинуты во времени относительно значений температур исходной термопары №40. Это свидетельствует о распространении приваривания слитка на большую площадь кристаллизатора.

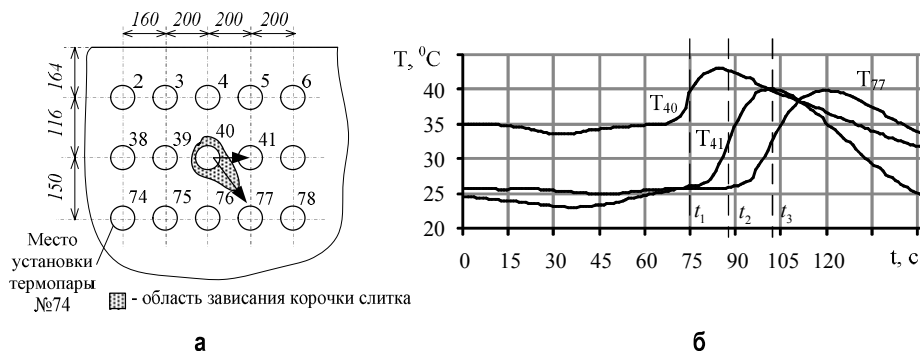


Рис. 1. Зависание корочки слитка в кристаллизаторе: а – фрагмент медной стенки; б – временные диаграммы изменения температуры T_j на термопарах №40, 41, 77

Разработанный алгоритм диагностирования прошел промышленную апробацию на МНЛЗ №1-5 ОАО «ММК», в ходе которой в течение года выявлены все случаи зависания корочки слитка в кристаллизаторе при низком количестве ложных диагнозов (1 ложный диагноз в месяц) [4].

Диагностирование оборудования слябовых МНЛЗ по изменению значений токов нагрузки (развиваемого момента) электродвигателей является перспективным направлением в функциональной диагностике металлургических агрегатов.

Указанный метод применен в системах диагностики электроприводов тянущих роликов МНЛЗ №1-5 ОАО «ММК». Характерными технологическими дефектами электроприводов тянущих роликов зоны вторичного охлаждения МНЛЗ являются:

- прогиб и износ бочек роликов;
- периодические буксовки тянущего ролика по слитку;
- случайные буксовки тянущего ролика по слитку;
- повреждения подшипниковых узлов;
- дефекты редукторов линии привода;
- колебания статического момента нагрузки электропривода тянуще-правильного устройства [6].

На основании анализа форм изменения во времени значений токов нагрузки (моментов) электродвигателей определены их характерные формы для каждого характерного дефекта электропривода тянущих роликов. Для каждого типа дефектов определены диагностические признаки в частотной и временной областях изменения токов нагрузок. Для каждого диагно-

стического признака определены доверительные интервалы их наблюдения и по совокупности диагностических признаков установлены интегральные условия диагностирования. Разработаны алгоритмы диагностирования технологических дефектов электроприводов исполнительных механизмов.

Системы диагностирования электроприводов тянущих роликов МНЛЗ №1-4 и МНЛЗ №5 эксплуатируются с 2005 и 2011 гг. соответственно.

В рамках **научного направления, посвященного разработке систем непрерывного контроля технического состояния силовых трансформаторов**, руководителями которого являются д-р техн. наук, профессор Карандаев А.С. и канд. техн. наук, доцент Евдокимов С.А., выполнено пять договорных научно-исследовательских работ с ОАО «ММК». Часть работ направлена на создание и применение методик и технических средств акустического контроля частичных разрядов (ЧР), возникающих в изоляции силового маслонаполненного оборудования.

Проведены исследования причин и условий возникновения неисправностей в силовых трансформаторах энергосистемы ОАО «ММК» за длительный период (около 10 лет). С этой целью был разработан аппаратно-программный комплекс на основе переносного прибора анализа ЧР и локализации зон дефектов в изоляции высоковольтного оборудования AR-700 [7]. Определено, что сетевые и блочные трансформаторы 110 кВ относятся к группе, имеющей самую высокую частоту появления повреждений. Анализ их распределения по основным узлам трансформаторов показал, что наибольшую повреждаемость имеют: высоковольтные вводы – 22%, обмотки – 16%, устройства РПН – 13,5% [8, 9]. Исследования, выполненные на однотипных трансформаторах, подтвердили прямую взаимосвязь частоты возникновения ЧР и длительности эксплуата-

ции трансформатора после капитального ремонта. Накопление информации и обработка сигналов позволили определить количественные характеристики ЧР [10-12]. Выполнена оценка технического состояния по результатам замеров и сопоставления показателей разрядной активности с нормативными. Впервые предложено применение методики и алгоритма обработки результатов периодической акустической локации ЧР на основе метода субтрактивной (горной) кластеризации, обеспечивающих локализацию и идентификацию неисправностей, а также оценку динамики их развития [13].

Наиболее сложную научную проблему представляет собой **создание систем непрерывного контроля технического состояния трансформаторов сверхмощных дуговых сталеплавильных печей (ДСП-180) и агрегатов печь-ковш (АПК)**, находящихся в эксплуатации в ЭСПЦ ОАО «ММК». В настоящее время завершены научно-исследовательские работы, в рамках которых разработаны и внедрены системы мониторинга параметров печных трансформаторов FTOHBR-150200/35 напряжением 35/(0,8-1,4) кВ, мощностью 150 МВА фирмы «TAMINI» (Италия), установленных на ДСП №1 и 2. Научным коллективом МГТУ совместно со специалистами производственно-внедренческой фирмы «Димрус» (г. Пермь) изготовлены и сданы в эксплуатацию на печных трансформаторах ДСП системы диагностического мониторинга TDMS (Transformer Diagnostics Monitor Special), имеющие аналогичные структуру и аппаратное исполнение. Общая структура технических средств системы TDMS представлена на рис. 3, где схематично показаны места установки датчиков, необходимых для оценки общего состояния трансформатора. Конструктивно система состоит из пяти модулей первичных датчиков и непосредственно основного прибора системы мониторинга, установленных в монтажном шкафу.

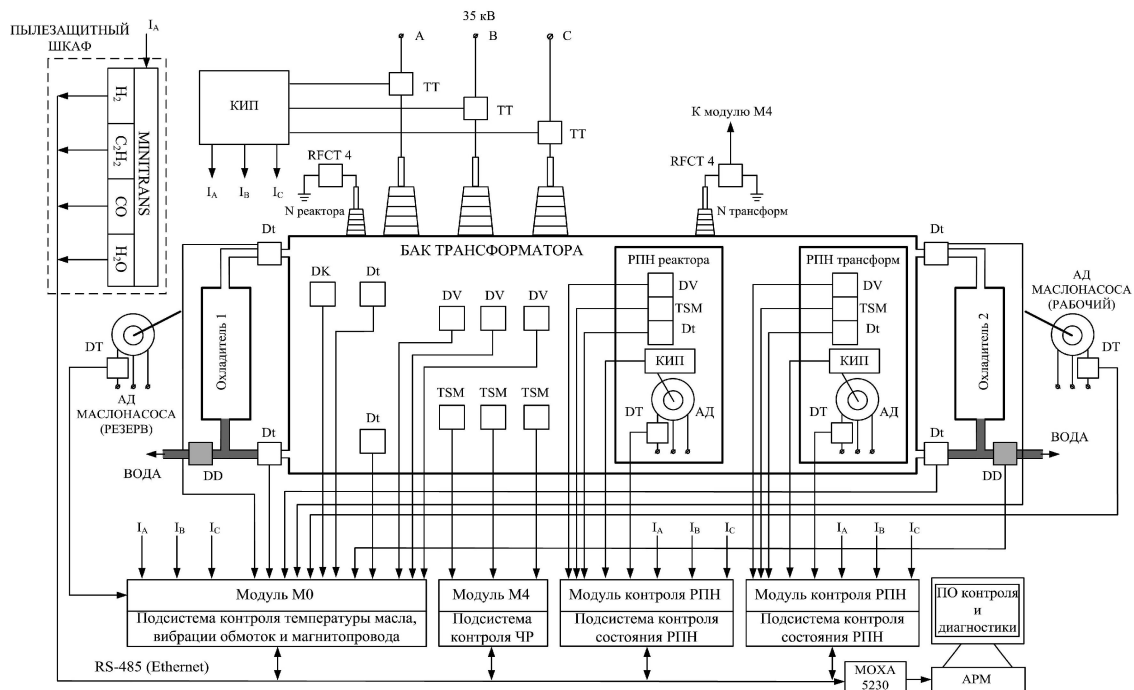


Рис. 3. Структура системы диагностирования состояния трансформатора дуговой сталеплавильной печи

В состав системы входят [14, 15]:

- диагностический комплекс MINTRANS, осуществляющий непрерывный контроль содержания растворенных газов и влажности трансформаторного масла;
- процессорный модуль контроля температурных и вибрационных параметров;
- процессорный модуль контроля частичных разрядов, осуществляющий оперативный контроль состояния изоляции вводов, обмоток и магнитопровода;
- два модуля контроля РПН трансформатора и РПН реактора на основании мониторинга температурных и вибрационных параметров, а также токов их электроприводов;
- удаленный сервер мониторинга и анализа диагностических параметров (установлен в помещении персонала сервисной службы);
- комплект датчиков контролируемых параметров трансформатора и другое специализированное оборудование.

Требования к данной системе рассмотрены в [16], подробное описание представлено в [14]. Там же приведены экранные формы, обеспечивающие наглядное представление временных зависимостей (трендов) контролируемых сигналов и обобщенных результатов диагностирования.

В настоящее время выполняется НИОКР по разработке и внедрению аналогичной системы на трансформаторе АПК №2.

Следующей задачей, решаемой научным коллективом, является *разработка системы мониторинга состояния асинхронных двигателей при питании от преобразователей частоты*. Практически все электроприводы вновь вводимых на комбинате технологических объектов выполняются на базе электроприводов переменного тока с частотным регулированием скорости. Задача диагностирования состояния асинхронного электродвигателя при частотном регулировании, а в ряде случаев – при групповом питании от преобразователя частоты (ПЧ), является принципиально новой и в настоящее время мало изученной.

В 2013 г. завершена научно-исследовательская работа по внедрению системы мониторинга технического состояния асинхронных двигателей секций №3 и 4 отходящего рольганга толстолистового стана 5000 ОАО «ММК» при групповом питании от преобразователей частоты (научные руководители – д-р техн. наук, профессор Карандаев А.С. и канд. техн. наук, доцент Евдокимов С.А.). Аппаратная структура разработанной системы представлена на рис. 4. Все аппаратные средства в составе данной структуры интегрированы на аппаратно-программном уровне в единую систему мониторинга, реализующую непрерывный контроль фазных токов и напряжений на выводах преобразователей частоты электроприводов секций рольгангов с последующим диагностическим анализом, определяющим факторы технического состояния групп электродвигателей.

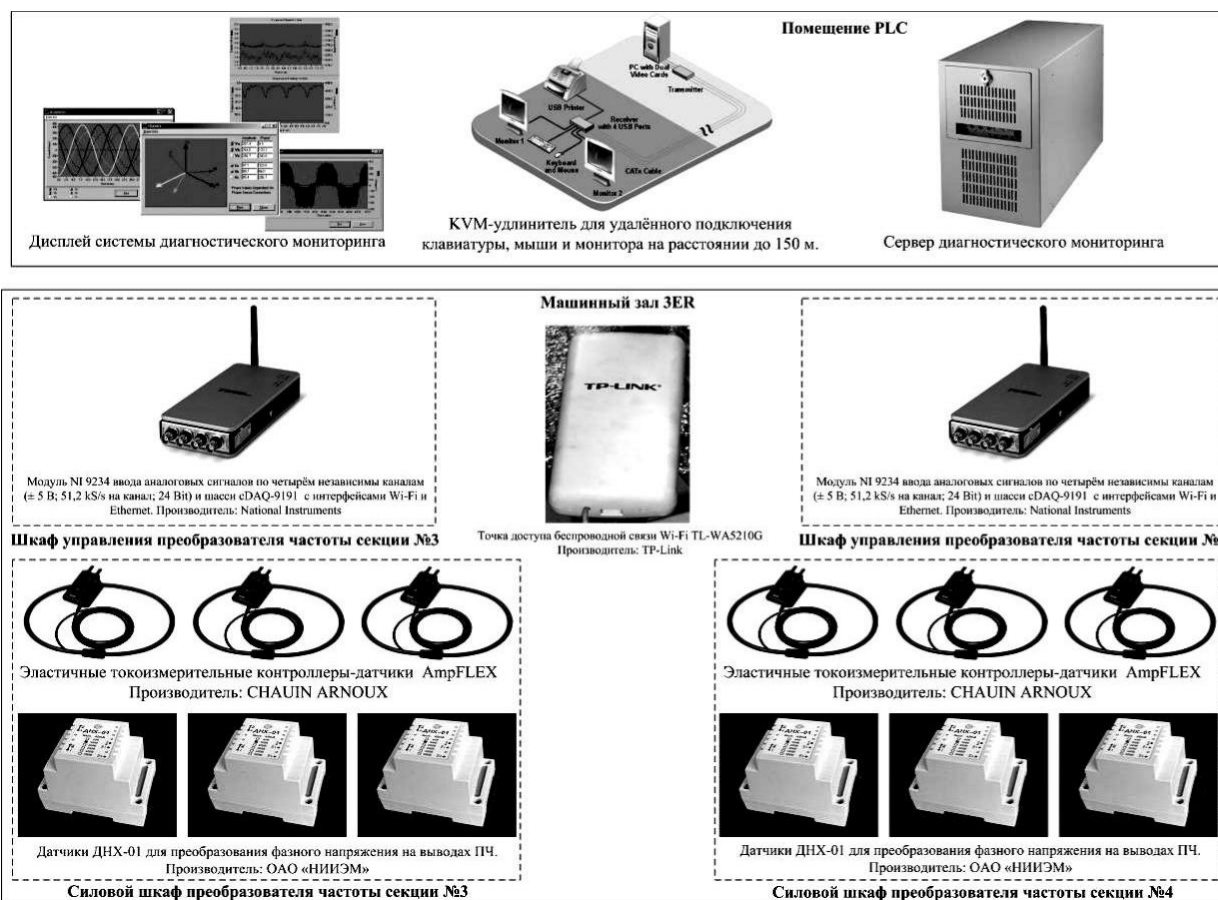


Рис. 4. Аппаратный состав системы мониторинга двигателей секций рольганга стана 5000

В качестве основных диагностических параметров обоснованы следующие функции и коэффициенты:

- взаимная корреляционная функция фазных токов, которая описывает степень сходства формы двух сигналов и их взаимное расположение друг относительно друга по координате (независимой переменной);
- отношение сигнал-шум в токах фаз асинхронного двигателя;
- спектр-токовый анализ.

Система мониторинга обеспечивает: повышение эффективности непрерывного контроля технического состояния электроприводов рольгангов; сокращение времени локализации, идентификации и устранения неисправностей на ранних стадиях развития; проведение анализа технического состояния групп двигателей рольгангов за продолжительный период эксплуатации с целью прогнозирования остаточного ресурса; повышение эффективности планирования и организации ремонтных работ с сокращением затрат на их проведение.

Научной группой под руководством д-р техн. наук, профессора Сарварова А.С. при непосредственном участии канд. техн. наук, доцента Петушкова М.Ю. разработан **новый метод диагностирования асинхронных двигателей**, позволяющий определять их техническое состояние по обобщенному вектору тока в пусковых режимах [17].

В результате длительных экспериментальных исследований показано, что ряд диагностических признаков не удается обнаружить, и тем более идентифицировать, при проведении исследований в установленных режимах, так как большинство двигателей имеют нагрузку значительно ниже номинальной. Обоснована целесообразность проведения исследований при нагрузках, превышающих номинальные значения, а именно в переходных процессах, так как большинство дефектов на ранней стадии возникновения могут проявиться именно в этих режимах.

В результате предложен новый подход в диагностике асинхронных двигателей, основанный на оценке статорного тока во время пуска. Принцип суперпозиции, который применяется для диагностики неисправного ротора асинхронного двигателя в стационарном режиме, был распространен и для динамических режимов [18]. Показано, что сочетание принципа суперпозиции с применением пошагового метода конечных элементов обеспечивает точную оценку тока статора. Данный подход может быть использован для установления дефекта независимо от условий эксплуатации двигателя, выбранного инструмента обработки сигнала и других факторов. Проверка предлагаемого подхода (рис. 5) показывает, что он хорошо согласуется с экспериментальными результатами, а также с вопросами, ранее освещавшимися в технической литературе.

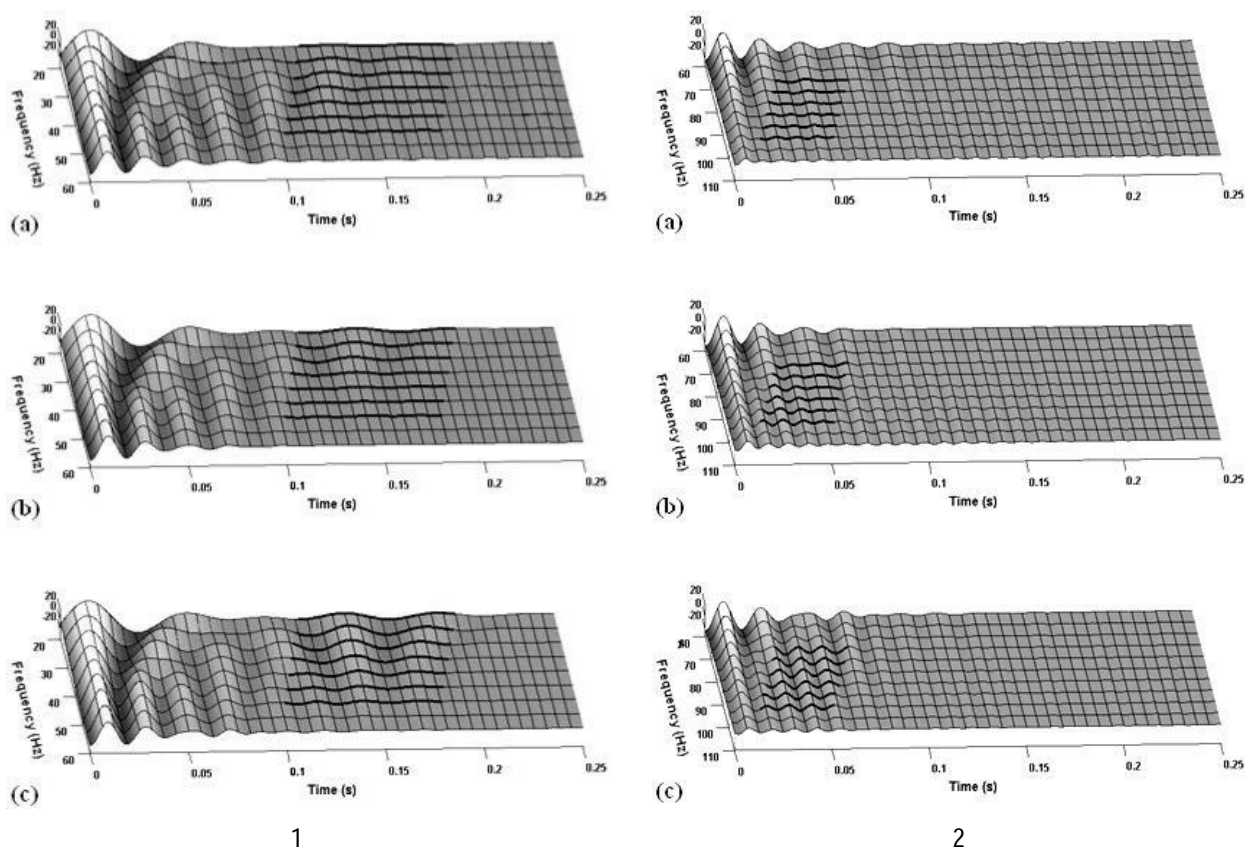


Рис. 5. Спектрограммы экспериментально измеренного значения тока модуля вектора Парка во время пуска исправного двигателя (а), двигателя с 2-мя сломанными стержнями ротора (б) и двигателя с 4-мя сломанными стержнями ротора (с): 1 – диапазон частот 20-60 Гц; 2 – диапазон частот 60-110 Гц

Исследования процессов пуска различных асинхронных двигателей механизмов горно-обогатительного производства ОАО «ММК» позволили собрать обширный статистический ряд обобщенных векторов пуска. С периодичностью раз в квартал, начиная с февраля 2010 г., обследовались более 50 двигателей мощностью от 2,2 кВт (двигатель вытяжной вентиляции поста сварки) до 132 кВт (двигатель вентилятора).

В качестве аппарата обработки сигналов выбрано непрерывное вейвлет-преобразование SWT из пакета MatLab. Континуальный вейвлет-анализ представляет собой достаточно гибкий и в то же время весьма мощный инструмент временного и спектрального анализа, целью которого является построение частотно-временных характеристик сигналов, во многом проясняющих природу сигналов в целом и их составляющих.

В результате сопоставления теоретических и экспериментальных данных подтверждено, что непрерывное вейвлет-преобразование SWT обобщенного вектора тока при пуске позволяет выявить на ранних стадиях и такую неисправность, как старение изоляции, приводящую к межвитковому замыканию.

Заключение

Юбилейным событиям сотрудники института энергетики и автоматики посвящают свои лучшие научные достижения, которых в истекшие годы накопилось немало. Интенсивно развивается относительно новое направление, связанное с проблемами непрерывного контроля и диагностирования технического состояния ответственного оборудования агрегатов, непосредственно обеспечивающих технологический цикл и энергетическую безопасность металлургического предприятия. К таким агрегатам относятся дуговые сталеплавильные печи, машины непрерывного литья заготовок, прокатные станы, энергоблоки электростанций, высоковольтные трансформаторы подстанций. Данное научное направление непосредственно связано с проблемами энергосбережения, сохранения ресурса и повышения срока эксплуатации дорогостоящего оборудования, снижению по реальному техническому состоянию. Об актуальности и востребованности направления свидетельствуют разработанные и внедренные на технологических объектах ОАО «ММК» системы мониторинга и диагностирования состояния, далеко не полная информация о которых представлена в настоящей статье.

Список литературы

1. Лукьянов С.И., Суспицын Е.С., Пишнограев Р.С. Диагностирование электропривода тянуще-правильного устройства МНЛЗ: монография. Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 2005. 150 с.
2. Лукьянов С.И., Пишнограев Р.С., Суспицын Е.С. Диагностирование электропривода отводящего рольганга широкополосного стана горячей прокатки: монография. Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 2008. 102 с.

3. Обобщенная методика диагностирования механического и электрического оборудования металлургических агрегатов / М.В. Коновалов, С.И. Лукьянов, Е.С. Суспицын и др. // Изв. вузов. Электромеханика. 2009. №1. С. 38-42.
4. Лукьянов С.И., Суспицын Е.С., Красильников С.С. Совершенствование системы управления электроприводами основных механизмов МНЛЗ: монография. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2011. 91 с.
5. Лукьянов С.И., Пишнограев Р.С., Красильников С.С. Применение двумерной интерполяции в задачах теплового мониторинга процесса первичной кристаллизации слитка на МНЛЗ // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах: междунар. сб. науч. трудов. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2011. Ч. II. С. 61-67.
6. Лукьянов С.И., Суспицын Е.С., Коновалов М.В. Система диагностирования механического оборудования электропривода тянущих роликов машины непрерывного литья // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2011. №3. С. 23-25.
7. Аппаратно-программный комплекс диагностирования силовых трансформаторов / А.С. Карандаев, С.А. Евдокимов, С.Л. Цемошевич, С.Е. Мостовой // Современные информационные технологии: труды междунар. науч.-техн. конференции. Пенза: Пензенская государственная технологическая академия, 2011. Вып. 13. С. 16-22.
8. Карандаева О.И. Характеристика повреждаемости сетевых и блочных трансформаторов ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». Вып. 16. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2011. №34(251). С. 15-20.
9. Анализ повреждаемости силовых трансформаторов электростанций металлургического комбината / Е.А. Кузнецов, А.Я. Альбрехт, О.И. Карандаева, С.Л. Цемошевич // Изв. вузов. Электромеханика. 2011. №4. С. 82-85.
10. Диагностирование силовых трансформаторов методом акустической локализации частичных разрядов / А.С. Карандаев, С.А. Евдокимов, Д.Х. Девятков, Б.Н. Парсункин, А.А. Сарлыбаев // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2012. №1. С. 105-108.
11. Основные неисправности и методы диагностирования силовых трансформаторов в условиях эксплуатации / И.Г. Гун, В.М. Салганик, С.А. Евдокимов, А.А. Сарлыбаев // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2012. №1. С. 102-105.
12. Контроль технического состояния силовых трансформаторов методом акустического диагностирования / А.С. Карандаев, С.А. Евдокимов, О.И. Карандаева, С.Е. Мостовой, А.А. Чертоусов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». Вып. 10. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2008. № 26(126). С. 26-31.
13. Методика диагностирования силовых трансформаторов на основе кластерной обработки акустических сигналов / А.С. Карандаев, С.А. Евдокимов, С.Л. Цемошевич, С.Е. Мостовой, А.В. Ануфриев, А.А. Сарлыбаев // Изв. вузов. Электромеханика. 2011. №4. С. 86-90.
14. Внедрение системы оперативного контроля технического состояния трансформатора дуговой сталеплавильной печи / С.А. Евдокимов, А.А. Сарлыбаев, О.И. Карандаева, Р.А. Леднов // Повышение эффективности энергетического оборудования: материалы VIII междунар. науч.-практ. конференции. М.: МЭИ, 2013. С. 284-302.
15. Диагностирование технического состояния силовых трансформаторов как составляющая SMART GRID-технологий в промышленных электросетях / А.С. Карандаев, А.А. Николаев, С.А. Евдокимов, Л.А. Маслов // Современные информационные технологии: труды междунар. науч.-техн. конференции. Пенза: Пензенская государственная технологическая академия, 2013. Вып. 17. С. 132-139.
16. Требования к системе мониторинга технического состояния трансформатора сверхмощной дуговой сталеплавильной печи / А.С. Карандаев, С.А. Евдокимов, А.А. Сарлыбаев, Р.А. Леднов // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2013. №2. С. 58-68.
17. Купцов В.В., Петушков М.Ю., Сарваров А.С. Метод расчета электромагнитного момента для задач конечно-элементного моделирования асинхронного двигателя // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». Вып.13. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2010. №14(190). С. 57-61.
18. Купцов В.В., Горзунов А.С., Сарваров А.С. Разработка методики токовой диагностики асинхронных двигателей по осциллограммам нестандартных режимов работы // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». Вып. 19. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2009. №4. С. 60-67.

THE DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF INTELLIGENT SYSTEMS FOR ELECTRICAL EQUIPMENT STATE DIAGNOSTICS

Lukyanov Sergey Ivanovich – D.Sc. (Eng.), Professor, Director of Power Engineering and Automated Systems Institute, Head of Electronics and Microelectronics Engineering Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia. Phone: 8(3519) 22-72-79.

Karandaev Alexander Sergeevich – D.Sc. (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia. Phone: 8 (3519) 29-84-16. E-mail: askaran@mail.ru.

Evdokimov Sergej Alekseevich – Ph.D. (Eng), Associate Professor, Electronics and Microelectronics Engineering Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia. Phone: 8 (3519) 29-85-86. E-mail: evdmgtu@yandex.ru.

Sarvarov Anvar Sabulhanovich – D.Sc. (Eng.), Professor, Head of the Automated Electric and Mechatronics Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia. Phone: 8(3519) 22-45-87. E-mail: anvar@magtu.ru.

Petushkov Mihail Jur'evich – Ph.D. (Eng), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia. Phone: 8 (3519) 29-85-86. E-mail: petushkov_m@mail.ru.

Khramshin Vadim Rifhatovich – Ph.D. (Eng), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia. Phone: 8 (3519) 29-84-16. E-mail: hvr_mgn@mail.ru.

Abstract. One of the main research fields of the Power Engineering and Automated Systems Institute research teams of Nosov Magnitogorsk State Technical University (NMSTU) is the development of continuous monitoring and state diagnostic systems for electrical equipment of metallurgical facilities. The technological defect diagnostic principle for slab continuous casting machines was considered on the basis of analysis of heat exchange process characteristics between the working face of the mould walls and the ingot. The diagnostic method of equipment for electric motor load current regulation was also considered. The article shows the functional flow diagram of transformer state continuous control system of ultra-high power electric arc furnaces. This control system was implemented in the electric furnace shop of OJSC «MMK». The analysis of the technical state monitoring system of the group electric drive induction motors at the rolling table sections of the 5000 rolling mill was carried out. A new method was offered for induction motor technical state monitoring using the generalized current vector in starting conditions. The research team carried out the comparative analysis of experimentally measured current spectral recording and justified the application of continuous wavelet transformation of the generalized current vector.

Keywords: metallurgical enterprise, billet continuous casting machine, power station, electric arc furnace, power transformer, plate hot rolling mill, rolling table, controlled electric drive, induction motor, technical state, monitoring, systems, methods, implementation.

References

1. Lukyanov S.I., Suspitsin E.S., Pishnograev R.S. *Diagnostirovanie jelektroprivoda tjanushhepravil'nogo ustrojstva MNLZ: monografija*. [Diagnostics of withdrawal and straightening unit electric drive of billet continuous casting machine: monograph]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2005, 150 p.
2. Lukyanov S.I., Pishnograev R.S., Suspitsin E.S. *Diagnostirovanie jelektroprivoda otvodjashhego rol'ganga shirokopolosnogo stana gorjachej prokatki: Monografija*. [Diagnostics of runoff table electric drive of wide strip hot rolling mill: Monograph]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2008, 102 p.
3. Konovalov M.V., Lukyanov S.I., Suspitsin E.S. et al. Obobshhennaja metodika diagnostirovanija mehanicheskogo i jelektricheskogo oborudovanija metallurgicheskikh agregatov. [General method of monitoring mechanical and electrical equipment of metallurgical facilities]. *Izvestija vuzov. Jeletromehaniika*. [Proceedings of universities. Electromechanics], 2009, no. 1, pp. 38-42.
4. Lukyanov S.I., Suspitsin E.S., Krasilnikov S.S. *Sovershenstvovanie sistemy upravlenija jelektroprivodami osnovnykh mehanizmov MNLZ: monografija*. [Enhancement of electric drive control systems of billet continuous casting machine: monograph]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2011, 91 p.
5. Lukyanov S.I., Pishnograev R.S., Krasilnikov S.S. Primenenie dvumernoj interpoljacji v zadachah teplovogo monitoringa processa pervichnoj kristallizacii slitka na MNLZ. [Application of two-dimensional interpolation in thermal monitoring of ingot initial solidification process at billet continuous casting machine]. *Matematicheskoe i programnoe obespechenie sistem v promyshlennoj i social'noj sferah*. [Mathematical support and software in industry and social services]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2011, Part II, pp. 61-67.
6. Lukyanov S.I., Suspitsin E.S., Konovalov M.V. Sistema diagnostirovanija mehanicheskogo oborudovanija jelektroprivoda tjanushhih rol'kov mashiny nepreryvnogo lit'ja. [Diagnostic system of electric drive mechanical equipment of continuous casting machine pulling rolls]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta im. G.I. Nosova*. [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2011, no. 3, pp. 23-25.
7. Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Tsemoshevich S.L., Mostovoy S.E. Apparato-programmnyj kompleks diagnostirovanija silovykh transformatorov. [Hardware and software complex of power transformer monitoring]. *Sovremennye informacionnye tehnologii: Trudy mezhdunarodnoj nauchno-tehničeskoi konferencii*. [Current information technology: Articles of the international scientific and technical conference], Penza: Penza State Technological Academy, 2011, Iss. 13, pp. 16-22.
8. Karandaeva O.I. Harakteristika povrezhdaemosti setevykh i blochnykh transformatorov OAO «Magnitogorskij metallurgicheskij kombinat». [Damage rate characteristic of mains supply and package transformers at «MMK» OJSC]. *Vestnik Juzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Serija «Jenergetika»*. Vyp. 16. [Vestnik of South Ural state university. «Power engineering» Series. Iss. 16]. Chelyabinsk: Publishing house of South Ural State University, 2011, no. 34 (251), pp. 15-20.
9. Kuznetsov E.A., Albreht A.Ya., Karandaeva O.I., Tsemoshevich S.L. Analiz povrezhdaemosti silovykh transformatorov jelektrostancij metallurgicheskogo kombinata [Damage rate analysis of power transformers at metallurgical plant power stations]. *Izvestija vuzov. Jeletromehaniika*. [Proceedings of universities. Electromechanics], 2011, no. 4, pp. 82-85.
10. Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Devyatov D.H., Parsunkin B.N., Sarlibaev A.A. Diagnostirovanie silovykh transformatorov metodom akusticheskoj lokacii chastichnykh razrjadov. [Power transformer diagnostics using the method of partial discharge acoustic radar]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta im. G.I. Nosova*. [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2012, no. 1, pp. 105-108.
11. Gun I.G., Salganik V.M., Evdokimov S.A., Sarlibaev A.A. Osnovnye neispravnosti i metody diagnostirovanija silovykh transformatorov v uslovijah jekspluatacii. [Main faults and diagnostic methods of power transformers in operating conditions]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta im. G.I. Nosova*. [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2012, no. 1, pp. 102-105.
12. Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Karandaeva O.I., Mostovoy S.E., Chertousov A.A. Kontrol' tehničeskogo sostojanija silovykh transformatorov metodom akusticheskoj diagnostirovanija. [Control of power transformer technical state using acoustic diagnostics method]. *Vestnik Juzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Serija «Jenergetika»*. Vyp. 10. [Vestnik of South Ural state university. «Power engineering» Series. Issue 10.]. Chelyabinsk: Publishing house of South Ural state university, 2008, no. 26(126), pp. 26-31.
13. Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Tsemoshevich S.L., Mostovoy S.E., Anufriev A.V., Sarlibaev A.A. Metodika diagnostirovanija silovykh transformatorov na osnove klasternoj obrabotki akusticheskikh signalov. [Power transformer diagnostic method on the basis of cluster processing of acoustic signals]. *Izvestija vuzov. Jeletromehaniika*. [Proceedings of universities. Electromechanics], 2011, no. 4, pp. 86-90.

14. Evdokimov S.A., Sarlibaev A.A., Karandaeva O.I., Lednov R.A. Vnedrenie sistemy operativnogo kontrolja tehničeskogo sostojanija transformatora dugovoj staleplavil'noj pechi. [Introduction of transformer technical state monitoring system of electric arc furnace]. *Povyshenie jeffektivnosti jenergetičeskogo oborudovanija: Materialy VIII Mezh-dunarodnoj nauchno-praktičeskoj konferencii*. [Improvement of energy equipment efficiency: Proceedings of VIII International scientific and technical conference.], Moscow: MPEI, 2013, pp. 284-302.
15. Karandaev A.S., Nikolaev A.A., Evdokimov S.A., Maslov L.A. Diagnostirovanie tehničeskogo sostojanija silovyh transformatorov kak sostavljajushhaja SMART GRID-tehnologij v promyshlennyh elektrosetjah [Diagnostics of power transformer technical state as a part of SMART GRID-technology in industrial power systems]. *Sovremennye informacionnye tehnologii: Trudy mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoj konferencii* [Current information technology: Articles of the international scientific and technical conference]. Penza: Penza State Technological Academy, 2013, Iss. 17, pp. 132-139.
16. Karandaev A.S., Evdokimov S.A., Sarlibaev A.A., Lednov R.A. Trebovanija k sisteme monitoringa tehničeskogo sostojanija transformatora sverhmoshnoj dugovoj staleplavil'noj pechi [Requirements to transformer technical state monitoring system of ultrahigh power electric arc furnace]. *Mashinostroenie: setevoj jelektronnyj nauchnyj zhurnal*. [Russian Internet Journal of Industrial Engineering], 2013, no. 2, pp. 58-68.
17. Kuptsov V.V., Petushkov M.Yu., Sarvarov A.S. Metod rasčeta jelektromagnitnogo momenta dlja zadach konečno-jelementnogo modelirovanija asinhronnogo dvigatelja [Electromagnetic torque calculation method for finite-element modeling of induction motor]. *Vestnik Juzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Serija «Jenergetika». Vyp. 13*. [Vestnik of South Ural state university. «Power engineering» Series. Issue 13]. Chelyabinsk: Publishing house of South Ural State University, 2010, no. 14 (190), pp. 57–61.
18. Kuptsov V.V., Gorzunov A.S., Sarvarov A.S. Razrabotka metodiki tokovoj diagnostiki asinhronnyh dvigatelej po oscillogrammam nestacionarnyh rezhimov raboty [Development of induction motor current monitoring method by oscillograph record of transient operating modes]. *Vestnik Juzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Serija «Jenergetika». Vyp. 19*. [Vestnik of South Ural state university. «Power engineering» Series. Issue 19]. Chelyabinsk: Publishing house of South Ural State University, 2009, no. 4, pp. 60-67.