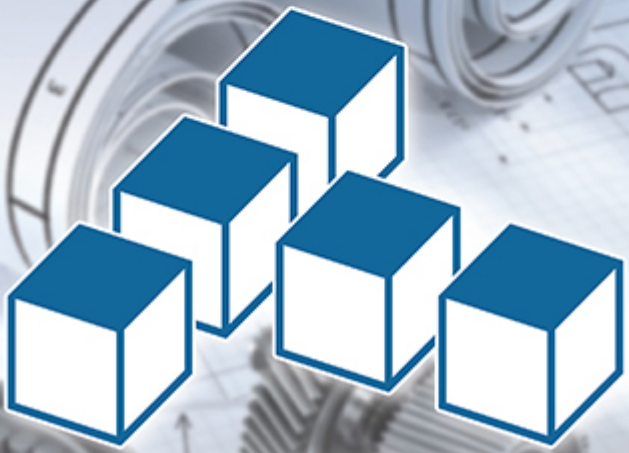
ISSN 2518-1653 (online)
vestnik.donntu.org

ДОНЕЦКОГО НАЦИОНАЛЬНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

ВЕСТНИК

№1 (11) 2018 г.



ТЕХНОПАРК

УНИВЕРСИТЕТСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

techpark.donntu.org



vk.com/technopark_donetsk

ВЕСТНИК ДонНТУ №1(11)'2018

международный научно-технический журнал

Учредитель и издатель: *ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)*

Главный редактор
Маренич К.Н. (д.т.н., проф.)*

Зам. главного редактора
Булгаков Ю.Ф. (д.т.н., проф.)*

Ответственный секретарь
Сотников А.Л. (д.т.н., доц.)*

Редакционный совет:
Артюх В. Г. (д.т.н., проф.)
Беломеря Н.И. (к.т.н., доц.)*
Бершадский И.А. (д.т.н., проф.)*
Бирюков А.Б. (д.т.н., проф.)*
Бутузова Л.Ф. (д.х.н., проф.)*
Высоцкий Ю.Б. (д.х.н., проф.)*
Горбатко С.В. (к.т.н., доц.)*
Горбатюк С. М. (д.т.н., проф.)*
Дедовец И.Г. (к.т.н., доц.)*
Еронько С.П. (д.т.н., проф.)*
Захаров Н.И. (д.т.н., доц.)*
Ковалев А.П. (д.т.н., проф.)*
Кожевникова И.А. (д.т.н., доц.)
Кондрахин В.П. (д.т.н., проф.)*
Кононенко А.П. (д.т.н., проф.)*
Куренный Э.Г. (д.т.н., проф.)*
Приседский В.В. (д.х.н., проф.)*
Ченцов Н.А. (д.т.н., доц.)*
Шабаев О.Е. (д.т.н., проф.)*
Шаповалов В.В. (д.х.н., проф.)*
Яковченко А.В. (д.т.н., проф.)*
* - *штатные сотрудники учредителя*

Адрес: 28300, г. Донецк, ул. Артема, 58
Телефон +380 (62) 304-60-82
Эл. почта: vestnikdonntu@gmail.com
Интернет: vestnik.donntu.org

Вестник ДонНТУ
2017. №4(10)

ISSN 2518-1653 (online)

Издается с января 2016 г.
Периодичность издания: 4 раза в год

Свидетельство о государственной регистрации № 000133 от 27.05.2017

За содержание статей и их оригинальность несут ответственность авторы. Мнение редакции может не совпадать с мнением авторов. За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель.

Подписано к печати по решению Ученого Совета ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет»
Протокол №2 от 23.03.2018

Формат 60×84 1/8. Заказ 0318.
Изд-во «Донецкая политехника», 2018

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

А.Л. Сотников, А.П. Мироненко, С.А. Руссиян, Д.В. Ильченко
Разработка принципов выставки оборудования сортовой МНЛЗ 3

ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

В.О. Гутаревич, К.А. Рябко, Е.В. Рябко
Проблемы и направления совершенствования экологических характеристик горно-транспортных машин с дизельной установкой 12

В.Н. Скляров
Оценка обобщенного показателя уровня качества роликов ленточных конвейеров 18

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

М.П. Дергилёв, С.Н. Ткаченко
Совершенствование условий работы электрооборудования в электрических сетях с изолированной и резонансно-компенсированной нейтралью в условиях сильной изношенности изоляции 24

И.В. Ковалева, О.К. Маренич
Техническая реализация токоограничения цепи короткого замыкания в контексте применения вакуумных коммутаторов 34

С.Н. Ткаченко, А.В. Коваленко, А.В. Панфилов
Роль и место ветроэнергетических установок в интеллектуальных энергосистемах концепции Smart Grid 41

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

А.Б. Бирюков, С.И. Гинкул, П.А. Гнитиёв, А.А. Иванова
Математическое моделирование работы печей с шагающими балками 48

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

Л.Ф. Бутузова, В.А. Колбаса, Г.Н. Бутузов, В.Н. Шевкопляс
Структурные показатели для оценки целесообразности переработки углей методом полукоксования 53

ИНФОРМАЦИЯ

Требования к статьям, направляемым в редакцию 60

Информация об издании

– На страницах журнала публикуются научные статьи фундаментального и прикладного характера, информация о конференциях, семинарах и выставках; освещается деятельность ведущих научно-исследовательских и проектных институтов, промышленных предприятий и коммерческих организаций, технопарков.

– Журнал оказывает информационную поддержку в продвижении на рынок конкурентоспособной наукоемкой продукции, проектов, научно-технических разработок и высоких технологий в различных областях промышленности.

– Журнал распространяется бесплатно в эл. виде посредством сети Интернет; принимает участие в научных конференциях и выставках.

– Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ). Интернет: elibrary.ru

– Журнал включен в перечень рецензируемых научных изданий Высшей аттестационной комиссии (ВАК) ДНР. Интернет: vak.mondnr.ru

– Редакция журнала принимает к публикации и осуществляет рецензирование рукописей статей по химическим и техническим наукам и следующим группам специальностей: 05.02 – Машиностроение и машиноведение; 05.05 – Транспортное, горное и строительное машиностроение; 05.09 – Электротехника; 05.16 – Металлургия и материаловедение; 05.17 – Химическая технология.

УДК 621.74.047.06:001

А.Л. Сотников /д.т.н./, Л.П. Мироненко, С.А. Руссиян /к.т.н./
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)
Д.В. Ильченко
Министерство транспорта Донецкой Народной Республики (Донецк)

РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПОВ ВЫСТАВКИ ОБОРУДОВАНИЯ СОРТОВОЙ МНЛЗ

Предложена технология и принципы рациональной выставки оборудования сортовых машин непрерывного литья заготовок, основанная на высокоточных онлайновых геодезических измерениях. Показано, что при выставке оборудования участка формирования непрерывнолитого слитка МНЛЗ относительно технологической оси в первую очередь следует руководствоваться отклонениями координат положения оборудования относительно заданных проектно-конструкторской документацией. Во-вторых – значением относительной разницы радиусов кривизны сопряженных дугообразных участков, образующих технологическую ось. Минимального значения разницы радиусов кривизны можно достичь путем совмещения их центров при условии равенства значения кривизны.

Ключевые слова: *МНЛЗ, технологическая ось, контроль положения, выставка оборудования, радиус кривизны.*

Постановка проблемы

Протяженность участка формирования непрерывнолитого слитка (НЛС) радиальной сортовой машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) составляет пару десятков метров, на протяжении которого механическое оборудование участка должно быть выставлено относительно дугообразной технологической оси ручья с точностью ±0,2-0,5 мм. В процессе эксплуатации МНЛЗ возникают отклонения (ошибки) положения оборудования значительно выше установленного допуска. Данные отклонения зависят от многих факторов, связанных как с точностью проведения сборочных и монтажных работ в процессе текущего и капитального ремонтов МНЛЗ, так и с техническим состоянием, условиями и режимами эксплуатации оборудования МНЛЗ. В ряде случаев обеспечить указанную точность выставки оборудования МНЛЗ относительно технологической оси ручья не получается, в связи с чем необходима разработка технологии и принципов высокоточной выставки оборудования машины.

Анализ последних исследований и публикаций

Как правило, контроль положения и выставка оборудования МНЛЗ осуществляется относительно рядом расположенного оборудования с помощью строительных уровней, отвесов и струн, линеек и шаблонов. При этом руководствуются положениями, разработанными в 80-х годах прошлого века [1], или проектно-конструкторской документацией заводов-изготовителей современных МНЛЗ.

Известен ряд работ отечественных и зарубежных специалистов по разработке различных методов контроля положения узлов и механизмов МНЛЗ относительно рядом расположенного оборудования [2 и др.]. Практического применения данные разработки не нашли в силу несовершенства технических решений и применявшихся электронно-вычислительных средств на момент их разработки в 80-90-х годах XX века.

С появлением современных технологий и инструментов геодезических методов контроля положения оборудования, а также электронно-вычислительных средств стало возможным решение задач точной выставки оборудования относительно технологической оси МНЛЗ [3-6]. В основе разработанных технологий используется электронный тахеометр [6-8], позволяющий выполнять измерение расстояний, горизонтальных и вертикальных углов, а также определять координаты и высоты точек с точностью 0,1 мм.

При этом на практике при контроле положения и выставке оборудования сортовых МНЛЗ с помощью разработанных технологий всегда возникал вопрос – какими принципами выставки оборудования следует руководствоваться? Стремиться к обеспечению отклонений положения оборудования в пределах установленного допуска или обеспечению заданной формы технологической оси ручья МНЛЗ? При этом, как было установлено на практике, отклонения положения оборудования в пределах установлен-

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

ного допуска не гарантируют соответствие формы технологической оси ручья МНЛЗ заданной проектно-конструкторской документации машины.

Цель (задачи) исследования

Целью настоящей работы является установка взаимосвязи между отклонениями положения оборудования участка формирования НЛС и формой технологической оси ручья МНЛЗ на данном участке с разработкой принципов высокоточной выставки оборудования сортовой МНЛЗ относительно технологической оси ручья.

Основной материал исследования

Выбор формы технологической оси МНЛЗ и расположение оборудования участка формирования НЛС осуществляется при профилировании технологического канала МНЛЗ из условия осуществления литья заготовок с расчетной максимальной скоростью и движения слитка с минимальными напряжениями деформации правки для вывода его на горизонт.

Минимальные напряжения деформации зависят от радиуса кривизны технологической оси машины и шага установки роликов зоны вторичного охлаждения (ЗВО) и тянуще-правильного устройства (ТПУ) [9-12]. Переменный радиус технологической оси обеспечивает в процессе литья заготовок прогрессирующую правку НЛС по нескольким участкам разгиба, характеризующимся различными радиусами для вывода на горизонт. Радиус начальной дуги окружности является базовой характеристикой радиальной МНЛЗ. Таким образом, к основным параметрам технологической оси МНЛЗ, то есть к базовым конструкторским параметрам машины, относятся базовый радиус и сопряженные радиусы разгиба слитка при многоточечном разгибе, шаг расстановки роликов вдоль оси, отклонение роликов от оси и длина технологической оси.

При профилировании технологического канала ручья МНЛЗ и выбора его основных параметров учитывается, что напряжения деформации правки σ_n слитка для вывода его на горизонт зависят от радиуса кривизны R технологической оси, например, в простейшем виде [2]:

$$\sigma_n = \frac{Eh}{2R},$$

где E – модуль упругости металла НЛС при температуре плавки; h – толщина слитка.

Из приведенной зависимости следует, что изменение радиуса кривизны технологической оси приводит к изменению напряжения правки, при этом зависимость линейная. Увеличение радиуса кривизны на 10 % приведет к пропорциональному повышению напряжения деформации также на 10 %, и наоборот. При этом если рассмотреть возможность изменения радиуса кривизны на ±0,2-0,5 мм (в пределах установленного проектно-конструкторской документацией допуска), то видно, что это не отразится на значении напряжения деформации.

В случае многоточечного разгиба НЛС технологическая ось ручья МНЛЗ образуется совокупностью сопряженных дуг окружностей с различными радиусами. В этом случае кривизна технологической оси и степень деформации должны быть постоянными на всем участке формирования слитка. Функция кривизны, а также первая и вторая ее производные не должны иметь разрывов. А это будет возможно, если кривизна каждого дугообразного участка технологической оси, характеризуемого своим радиусом дуги (кривизны), будут равны как между собой, так и некоторому заданному значению. В общем случае кривизна равна:

$$K = \frac{1}{R}.$$

С помощью разработанной технологии выставки оборудования МНЛЗ были проведены работы по определению отклонений положения оборудования относительно технологической оси ручья радиальной сортовой МНЛЗ конструкции Danieli в условиях Донецкого электрометаллургического завода (ДЭМЗ) [13,14,15]. Результаты были получены следующие.

Установлено, что максимальное отклонение роликов от технологической оси ручья МНЛЗ было в ЗВО, минимальное – на ТПУ. Из четырех секций ЗВО ролики секций № 1 и № 2 имели значительные отклонения, соответственно – 32,71 и 21,37 мм. Отклонение положения роликов в вертикальной продольной плоскости привело к изменению шага расположения роликов. Среднее значение угла наклона нормали составляло 0,12°.

На рис. 1 приведена гистограмма распределения значений отклонений (с учетом знака) линейных координат положения роликов ЗВО и ТПУ. Среднее отклонение составляло 10,88 мм (максимальное – 46,59 мм, минимальное – 0 мм), что соответствует точности выставки оборудования с помощью таких широко применяемых инструментов, как линейки, машиностроительные уровни, струны и шаблоны [16].

По абсолютным координатам положения роликов ЗВО и тянущего ролика ТПУ можно

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

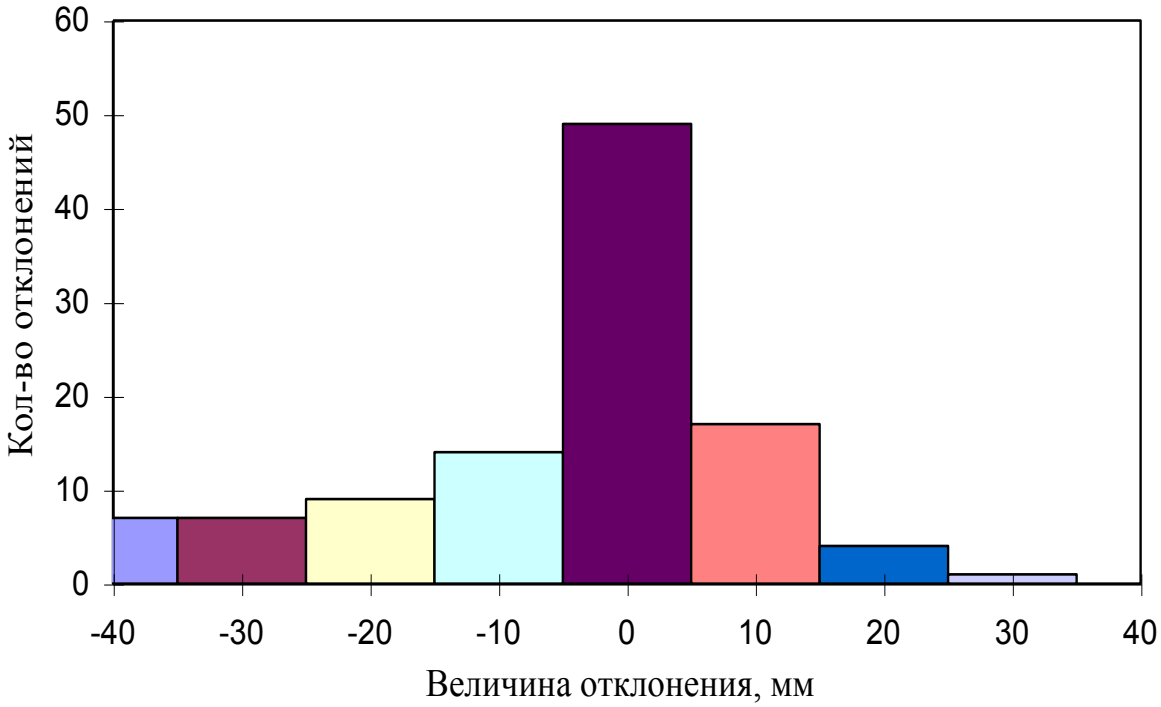


Рис. 1. Гистограмма распределения отклонений
фактических координат положения роликов ЗВО и ТПУ МНЛЗ Danieli

определить фактический радиус дуги окружности, являющейся технологической осью МНЛЗ. Это позволяет дать оценку технологической оси машины с точки зрения осуществления прогрессирующей правки НЛС.

Для определения радиуса дуги окружности, образующейся в результате расположения роликов ЗВО с отклонениями, была составлена следующая система уравнений (рис. 2) – математическая модель технологической оси:

$$\begin{cases} S_1^2 = (R+r_2)^2 + (R+r_1)^2 - 2(R+r_2)(R+r_1)\cos\alpha_1, \\ S_2^2 = (R+r_3)^2 + (R+r_2)^2 - 2(R+r_3)(R+r_2)\cos\alpha_2, \\ S_3^2 = (R+r_3)^2 + (R+r_1)^2 - 2(R+r_3)(R+r_1)\cos\varphi, \\ \varphi = \alpha_1 + \alpha_2 \end{cases}$$

где R – фактический радиус дуги окружности технологической оси; r_1, r_2 и r_3 – соответственно фактический радиус трех подряд расположенных роликов; α_1, α_2 и φ – углы между соответствующими прямыми, проведенными из фактического центра кривизны оси ручья МНЛЗ в центры трех подряд расположенных роликов; S_1, S_2 и S_3 – расстояние между центрами трех подряд расположенных роликов.

В результате вычислений был определен радиус дуги окружности и отклонения положения центра кривизны МНЛЗ фактической технологической оси каждого ручья МНЛЗ Danieli на участках между секциями № 1 и № 3 ЗВО и секции № 3 ЗВО и тянущим роликом ТПУ (табл. 1 и 2).

Из приведенных результатов вычислений следует, что отклонение радиуса дуги окружности на участке от секции № 3 ЗВО до тянущего

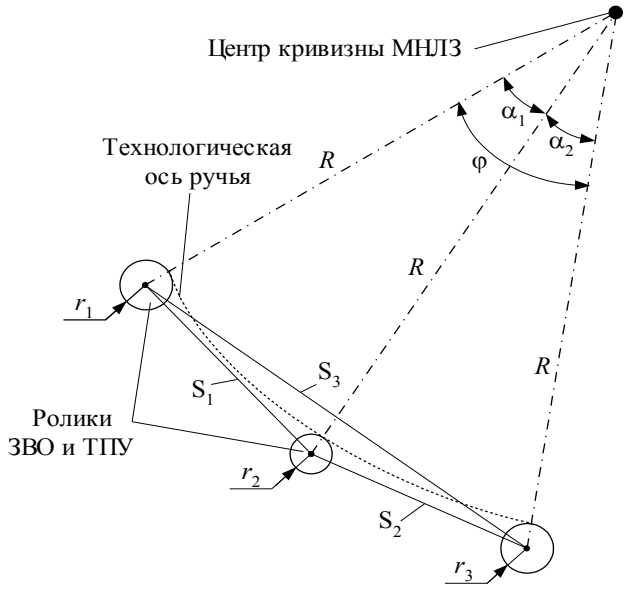


Рис. 2. Расчетная схема к определению фактического радиуса дуги окружности фактической технологической оси ручья МНЛЗ

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Табл. 1. Параметры фактических технологических осей ручьев МНЛЗ на участке между роликами секции № 1 и № 3 ЗВО

Ручей	Фактический радиус, R_1, мм	Отклонение радиуса, ΔR, мм	Отклонение координат центра кривизны МНЛЗ	
			ΔX, мм	ΔY, мм
№ 1	8325,44	325,44	222,53	–229,32
№ 2	7928,74	–71,26	–106,83	10,19
№ 3	8029,30	29,30	–26,33	–47,31
№ 4	7672,07	–327,93	–308,36	182,28
№ 5	7846,10	–153,90	–166,26	66,92
№ 6	7983,72	–16,28	61,74	10,83
Среднее значение	7964,23	–35,77	–53,92	–1,07

Табл. 2. Параметры фактических технологических осей ручьев МНЛЗ на участке между роликом секции № 3 ЗВО и тянущим роликом ТПУ

Ручей	Фактический радиус, R, мм	Отклонение радиуса, ΔR, мм	Отклонение координат центра кривизны МНЛЗ	
			ΔX, мм	ΔY, мм
№ 1	7911,29	–88,71	–45,83	86,35
№ 2	7855,08	–144,92	–58,83	140,19
№ 3	8013,87	13,87	–1,56	–9,22
№ 4	8001,56	1,56	–5,53	–1,93
№ 5	7909,24	–90,76	–40,85	83,42
№ 6	7916,88	–83,12	–53,03	79,60
Среднее значение	7934,65	–65,35	–34,27	63,07

ролика ТПУ в два раза больше, чем на участке между секциями № 1 и № 3 ЗВО. Неравенство радиусов на этих двух участках свидетельствует о наличии перегиба движущегося НЛС на ролике секции № 3 ЗВО и, соответственно, о действии дополнительных нагрузок как на слиток (второй концентратор напряжения в нем), так и на ролик. Меньшие отклонения фактического положения роликов ЗВО и ТПУ не всегда свидетельствует о меньшем значении усилий, действующих на них, что требует проведения дополнительных исследований.

Прогрессирующая правка НЛС на МНЛЗ Danieli осуществляется как минимум по трем участкам, характеризующимся различными радиусами дуги окружности, в отличие от требований по двухточечному разгибу, предъявляемых проектно-конструкторской документацией. Минимальное суммарное отклонение радиусов по двум участкам отмечено на ручье № 3 МНЛЗ. Наименьшее отклонение радиуса отмечено на участке между секцией № 3 ЗВО и тянущим роликом ТПУ ручья № 4-1,56 мм.

По результатам анализа отказов и неисправностей роликов ЗВО и ТПУ (табл. 3) сортовой МНЛЗ конструкции Danieli в условиях ДЭМЗ была отмечена корреляция между уровнем отклонений положения роликов ЗВО и ТПУ относительно технологической оси в радиальном направлении и количеством отказов, приходящихся на соответствующий ролик. Большее количество отказов приходится на ролики, имеющие значительные отклонения положения относительно технологической оси ручья МНЛЗ, что в принципе может и обуславливать возникновение данных отказов.

В процессе эксплуатации МНЛЗ Danieli в условиях ДЭМЗ наиболее часто происходили следующие виды отказов и неисправностей: износ и разрушение подшипников опор роликов; осевое смещение роликов; отсутствие стопорных колец; выработка на прижимных кулисах и заклинивание механизмов прижима роликов (табл. 3).

По результатам количественного анализа отказов и неисправностей роликов (см. табл. 3) следует, что бóльшее их количество приходится на ролики секции № 1 и № 3, соответственно, меньшее количество – в секциях № 2 и № 4. Больше всего отказов роликов приходится на ручьи № 1, № 2, № 5 и № 6, а меньше – на ручей № 3.

Значение и характер появления отклонений или ошибок положения оборудования МНЛЗ можно представить как случайные, вызывающие рассеяние точности конструкторских параметров машины. Изучение и анализ случайных отклонений, как правило, выполняют методами

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Табл. 3. Количественный анализ отказов и неисправностей роликов МНЛЗ конструкции Danieli

Ручей	Секция ЗВО				Всего отказов
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	
№ 1	5	2	6	1	14
№ 2	7	2	9	1	19
№ 3	2	1	6	1	10
№ 4	2	1	7	2	12
№ 5	7	5	7	1	20
№ 6	5	2	8	3	18
Всего отказов	28	13	43	9	93

статистики, основанными на теории вероятностей. Данные методы дают возможность установить определенную связь между возможными значениями случайной величины и вероятностью их проявления.

Суммарное отклонение (ошибку) положения оборудования МНЛЗ можно определить с помощью статистических методов на основе экспериментальных данных, т.к. числовые значения случайных величин группируются вокруг их среднего значения. Мерой рассеяния этих величин около центра группирования является среднеквадратическое отклонение.

Для проведения статистического анализа были взяты экспериментальные данные распределения отклонений фактических координат положения роликов ЗВО и ТПУ МНЛЗ Danieli.

Так как рассматривается достаточное число независимых однородных параметров, близко изменяющихся по значению, то закон рассеяния случайных величин приближается к закону нормального распределения. Этот закон графически выражается в виде симметричной кривой, асимптотически приближающейся к оси абсцисс. Площадь, ограниченная кривой нормального распределения и осью абсцисс, выражает вероятность попадания случайной величины в этот интервал. Доказано, что с вероятностью, равной 99,73 %, т.е. близкой к единице, поле рассеяния случайных величин относительно среднего значения лежит в пределах $\pm 3a$, где a – случайная величина [17]. Этот интервал необходимо сравнить с допустимым отклонением положения оборудования МНЛЗ. Если выполняется условие, что допускаемые отклонения положения $[\delta] \geq \pm 3\sigma_\delta$, где σ_δ – среднеквадратическое отклонение координат положения роликов ЗВО и ТПУ, то можно считать, что точность задания выполнена, то есть допуск технологически обеспечен.

Параметры распределения отклонений положения приведены в табл. 4. Статистическая обработка показала, что допускаемое предельное отклонение положения оборудования МНЛЗ при его монтаже с применением традиционных методов и средств составило:

$$\sigma_\delta = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{k}\left(\delta_i - \overline{\delta}\right)^2 m_i} = \sqrt{\frac{1}{108}12427{,}55} = 10{,}73 \text{ мм},$$

$$\overline{\delta} = \frac{1195}{108} = 11{,}06 \text{ мм},$$

где n=108 – число измерений; δ_i – случайная величина (отклонение положения ролика), мм; k – число различных значений (интервалов) случайной величины; m_i – частота появления случайной величины.

Тогда допускаемое предельное отклонение координат положения роликов ЗВО и ТПУ радиальной сортовой МНЛЗ при их контроле и выставке с помощью традиционных методов и средств составляет:

$$[\delta] \geq \pm 3 \cdot 11{,}06 = \pm 33{,}18 \text{ мм},$$

что явно не согласуется с требования проектно-конструкторской документации завода – изготовителя МНЛЗ.

Табл. 4. Параметры статистического распределения отклонения координат положения роликов ЗВО и ТПУ МНЛЗ Danieli

Интервал, δ_i, мм	Середина интервала, δ'_i, мм	Частота, m_i	$m_i\delta'_i$	$\delta'_i - \overline{\delta}$	$(\delta'_i - \overline{\delta})^2$	$m_i(\delta'_i - \overline{\delta})^2$
0…5	2,5	49	122,50	-8,56	73,36	3594,45
5…15	10	31	310,00	-1,06	1,13	35,15
15…25	20	13	260,00	8,94	79,84	1037,89
25…35	30	8	240,00	18,94	358,54	2868,33
35…40	37,5	7	262,50	26,44	698,82	4891,73
Сумма:	–	108	1195,00	–	–	12427,55

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

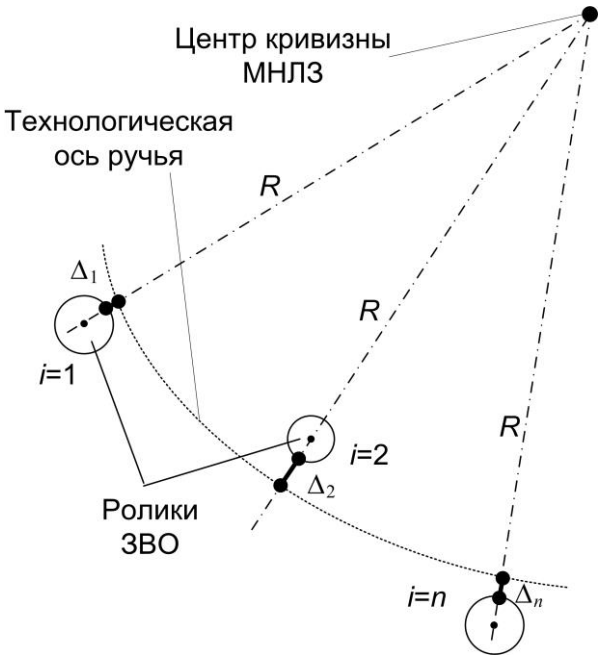


Рис.3. Расчетная схема для определения абсолютной погрешности и среднеквадратичного отклонения положения роликов ЗВО

Если рассматривать отклонения положения, например, роликов ЗВО относительно «идеальной» технологической оси, т.е. заданной согласно проектно-конструкторской документации в радиальном направлении (рис. 3), то согласно теории погрешностей можно вычислить абсолютную погрешность во всей системе роликовой проводки ЗВО:

$$\sum_{i=1}^{n}\Delta_i ,$$

где n – число роликов; Δ_i – отклонение i-го ролика от идеальной технологической оси, а также определить абсолютную погрешность на каждом ролике ЗВО:

$$\frac{\sum_{i=1}^{n}\Delta_i}{n}.$$

Среднеквадратичное отклонение положения ролика относительно «идеальной» технологической оси будет равно:

$$\sigma=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\Delta_i^{\,2}}{n-1}}.$$

В табл. 5 приведены результаты расчета для роликов ЗВО МНЛЗ Danieli по имеющимся экспериментальным данным. Анализ приведенных данных показывает, что наименьшая абсолютная погрешность и среднеквадратичное отклонение положения роликов наблюдается на ручье № 5, а наибольшее – на ручье № 6. Сам по себе данный анализ малоинформативен, т.к. не коррелируется ни с какими данными проведенных исследований.

Табл. 5. Абсолютная погрешность и среднеквадратичное отклонение положения роликов ЗВО относительно «идеальной» технологической оси

Ручей	Ролики ЗВО					$\sum_{i=1}^{n}\Delta_i$	$\frac{\sum_{i=1}^{n}\Delta_i}{n}$	$\sigma=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\Delta_i^{\,2}}{n-1}}$
	Δ_1	Δ_2	Δ_3	Δ_4	Δ_5			
№ 1	38,32	9,98	7,89	8,49	0,19	64,49	12,90	20,63
№ 2	32,87	20,65	1,59	6,86	1,92	60,05	12,01	19,75
№ 3	38,40	22,42	7,75	5,95	4,78	79,30	15,86	22,89
№ 4	22,93	28,38	3,36	1,76	0,07	56,36	11,27	18,34
№ 5	25,10	19,59	0,04	1,59	5,34	40,90	8,18	16,16
№ 6	38,66	27,19	12,60	10,42	0,87	88,00	17,60	25,01

Табл. 6. Параметры технологической оси в ЗВО МНЛЗ Danieli

Ручей	Радиус кривизны оси на участке между роликами, мм		Среднеквадратичное отклонение координат фактического центра кривизны	Относительная разница в значении радиуса кривизны, %
	секции № 1 и №3 ЗВО	секции № 3 ЗВО и тянущим роликом ТПУ		
№ 1	8325,44	7911,29	334,16	4,97
№ 2	7928,74	7855,08	186,09	0,93
№ 3	8029,30	8013,87	54,94	0,19
№ 4	7672,07	8001,56	358,25	4,12
№ 5	7846,10	7909,24	201,86	0,80
№ 6	7983,72	7916,88	112,06	0,93

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

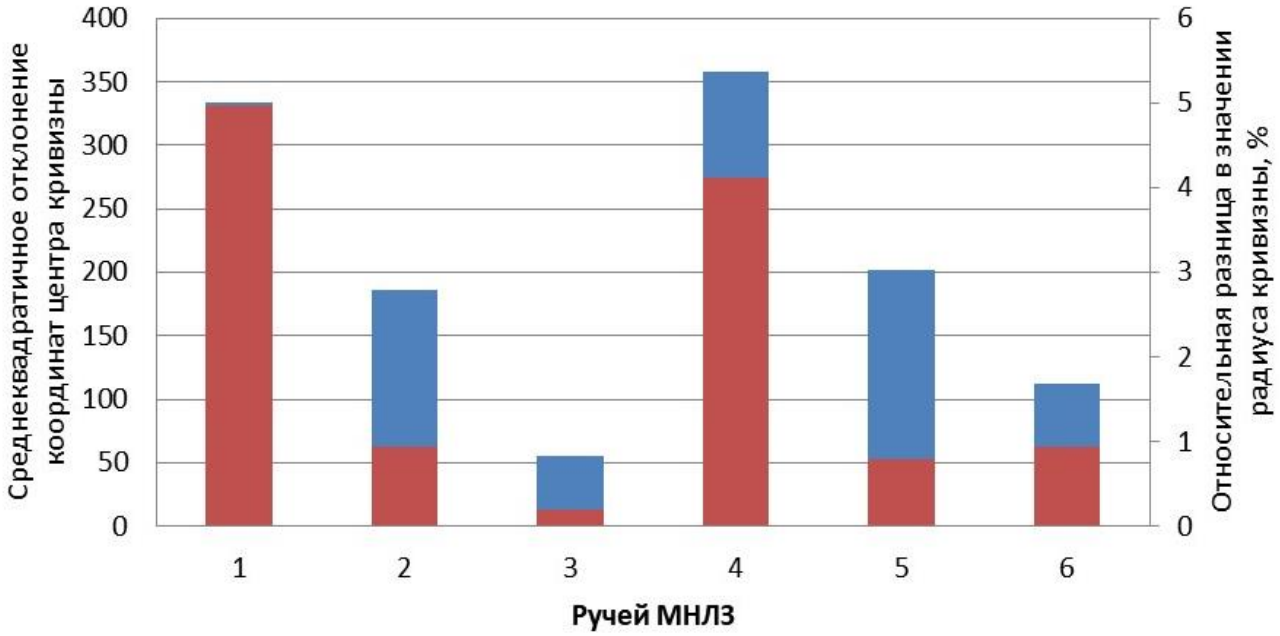


Рис. 4. Среднеквадратичное отклонение координат фактического центра кривизны – *1* и относительная разница в значении радиуса кривизны – *2* на участке технологической оси ЗВО МНЛЗ Danieli

Как показывают экспериментальные данные на МНЛЗ Danieli (см. табл. 1 и 2), технологическая ось в ЗВО имеет два участка с различным радиусом дуг окружностей, ее образующих. Каждая дуга окружности сопряжена с тремя роликами, последовательно расположенными. На основании данных, приведенных в табл. 1 и 2, имеется возможность дать количественную оценку нарушения формы технологической оси каждого ручья МНЛЗ, приведенную в табл. 6 и на рис. 4.

Сопоставление приведенных данных с результатами ранее выполненного причинно-количественного анализа отказов и неисправностей роликовой проводки ЗВО и ТПУ радиальной сортовой МНЛЗ Danieli позволяет сделать вывод о том, что именно разность значения кривизны сопряженных дугообразных участков, образующих технологическую ось ручья, является определяющим фактором безотказности оборудования участка формирования НЛС, стабильности и безопасности процессов непрерывной розливки стали на МНЛЗ.

Из приведенной на рис. 4 диаграммы следует, что технологическая ось ручья № 3, характеризующегося в рассматриваемом периоде времени минимальным количеством отказов и неисправностей (см. табл. 3), имеет переход от одного дугообразного участка к другому с изменением радиуса кривизны на 0,19 %, среднеквадратичное отклонение координат фактического центра кривизны составляет 54,94 мм. По ручьям № 2, № 5 и № 6 наблюдается картина, когда относительная разница в значении радиуса кривизны стремится к минимальному значению, а среднеквадратичное отклонение координат центра кривизны – к максимальному, что можно также сопоставить с низкими показателями безотказности оборудования МНЛЗ. По ручьям № 1 и № 4 картина также очевидна – увеличение отклонений положения центров кривизны сопряженных дугообразных участков технологической оси приводит к росту разницы в их радиусах кривизны.

Таким образом, при выставке оборудования участка формирования НЛС МНЛЗ относительно технологической оси, во-первых, следует руководствоваться отклонениями координат положения оборудования относительно заданных проектно-конструкторской документацией, во-вторых – значением относительной разницы кривизны сопряженных дугообразных участков, образующих технологическую ось.

Минимального значения разницы можно достичь путем совмещения их центров кривизны при условии равенства значения кривизны.

Отклонение оборудования МНЛЗ относительно технологической оси в радиальном направлении в диапазоне 0,2-0,5 мм установлено исходя из обеспечения минимального отклонения координат фактических центров кривизны сопряженных дугообразных участков технологической оси.

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Выводы

1. Причины отказов и неисправностей оборудования МНЛЗ заключаются, наряду с условиями эксплуатации и режимами работы машины, в нарушении технологий и методов обслуживания, ремонта, сборки и монтажа (выставки) узлов и механизмов оборудования, обуславливающих нарушение положения относительно технологической оси ручья и действие на них высоких динамических нагрузок.

2. Точность конструктивных параметров оборудования МНЛЗ должна обеспечиваться оперативным контролем и выставкой его положения с оценкой технического состояния как основополагающей причины отклонения технологической оси машины от проектного положения.

3. Полученные результаты оценки планово-высотного положения оборудования участка формирования НЛС сортовой МНЛЗ, выполненной с помощью разработанной технологии контроля, позволили подтвердить наличие отклонений и дать оценку как применяемым традиционным методам контроля положения и выставки оборудования, так и уровню отклонений его положения. Отклонения положения оборудования участка формирования НЛС превышают допустимые значения, установленные проектно-конструкторской документацией МНЛЗ, на несколько порядков.

4. Установлено, что определяющим условием точности конструктивных параметров МНЛЗ является относительная разница кривизны сопряженных дугообразных участков, образующих технологическую ось ручья. При выставке оборудования МНЛЗ необходимо обеспечить совмещение их центров кривизны при условии равенства значения кривизны для минимизации их относительной разницы.

Список литературы

1. Ведомственные строительные нормы: ВСН 396-85. Монтаж технологического оборудования сталеплавильных цехов. – М.: Минмонтажспецстрой СССР, 1986. – 30 с.
2. Тимохин, О.А. Особенности расчета технологической оси МНЛЗ и ее контроля / О.А. Тимохин. – Сталь. – 2000. – № 2. – С. 16-21.
3. Danieli Service customer technical support: Is your conticasteraligned properly? // Danieli News. – 2014. – No.170. – P. 98-99.
4. Industrial 3-D Surveying with Optical Instruments. – Witten (Germany): GLM Lasermeßtechnik GmbH, 2007. – 16 p.
5. Laser Tracker use in industrial maintenance: machine and plant engineering. Press Release. – Mannheim (Germany): Automated Precision Deutschland GmbH, 2007. – 3 p.
6. Шоломицкий, А.А. Контроль геометрических параметров машины непрерывного литья заготовок / А.А. Шоломицкий, А.Л. Сотников, В.И. Адаменко // Металлургические процессы и оборудование. – 2007. – № 3. – С. 27-30.
7. Сотников, А.Л. Контроль соосности оборудования МНЛЗ / А.Л. Сотников // Металлургические процессы и оборудование. – 2006. – № 1. – С. 24-27.
8. Sotnikov, A.L. Monitoring alignment of mold oscillatory motion with CCM process stream axis / A.L. Sotnikov, A.A. Sholomitskii // Metallurgist. – No. 60(9-10). – 2017. – P.1046-1053.
9. Машины непрерывного литья заготовок. Теория и расчет / Л.В. Буланов [и др.]. – Екатеринбург: Уральский центр ПР и рекламы «Марат», 2004. – 349 с.
10. Тимохин, О.А. Особенности расчета технологической оси МНЛЗ и ее контроля / О.А. Тимохин // Сталь. – 2000. – № 2. – С. 16-21.
11. К вопросу о выборе профиля кривой разгиба МНЛЗ / Л.В. Буланов [и др.] // Сталь. – 2000. – № 2. – С. 21-22.
12. Карлинский, С.Е. К вопросу выбора шагов роликов МНЛЗ по деформационной способности корки непрерывнолитого слитка / С.Е. Карлинский, В.М. Нисковских, Е.Ю. Гельфенбейн // Проектирование и анализ работы МНЛ в НИИ Уралмаш: сб. научн. тр. – 1984. – С. 63-65.
13. Сотников, А.Л. Контроль соосности оборудования МНЛЗ / А.Л. Сотников // Бюллетень науч.-техн. и эконом. инфор. «Черная металлургия» ОАО «Черметинформация». – 2006. – № 11. – С. 52-55.
14. Сотников, А.Л. Отклонения роликов зоны вторичного охлаждения от технологической оси МНЛЗ / А.Л. Сотников // Металлургические процессы и оборудование. – 2006. – № 2. – С. 43-48.
15. Могильный, С.Г. Геодезические работы при проверке соосности оборудования машины непрерывного литья заготовок / С.Г. Могильный, А.А. Шоломицкий, А.Л. Сотников // Металлургические процессы и оборудование. – 2009. – № 2. – С. 19-27.
16. Монтаж технологического оборудования сталеплавильных цехов: ВСН 396-78. – М.: Минионтажспецстрой СССР, 1986. – 65 с.
17. Кравченко, В.С. Монтаж судовых энергетических установок. – Л.: Судостроение, 1975. – 255 с.

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

A.L. Sotnikov /Dr. Sci (Eng.)/, L.P. Mironenko, S.A. Russian /Cand.Sci. (Eng.)/
Donetsk National Technical University (Donetsk)
D.V. Ilchenko
Ministry of Transport of Donetsk People's Republic (Donetsk)

DEVELOPMENT OF THE PRINCIPLES OF ALIGNMENT OF CCM EQUIPMENT

Background. *The problem of high-precision alignment of the equipment considered, as due to the imperfection of technical solutions in 80-90-ies of the XX century, the alignment control of the equipment was of a relative nature and carried out with the help of construction levels, plumbs, and other devices. With the advent of modern methods for geodetic control of the equipment position issues raised regarding deviations of the position of equipment within the established tolerance or maintenance of a specified form of the technological axis of the caster stream.*

Materials and/or methods. *The objective of this paper is the technological axis of the caster, the radius of curvature of which determines the choice of the main parameters of the technological channel of the caster stream. The basic technological parameters of the axis are the base radius and conjugate radii of the ingot multi-point straightening, the step of the rollers placement along the axis, the rollers deviation from the axis and the length of the technological axis.*

Results. *The result of the analysis of failures and malfunctions of the rollers of the secondary cooling zone (SCZ) and the withdrawal-straightening unit (WSU) of the Danieli continuous casting machine at the Donetsk Electrometallurgical Plant (DEMP) is the difference between the curvature values of mated arc sections forming the technological axis of the stream, that is a factor of reliability of the section equipment of formation of a conticast ingot (CCI), the stability and security of processes for continuous steel casting. When aligning the equipment of the section of CCI formation of the caster it is necessary to take into account the deviations of the coordinates of the position of the equipment relative to those specified in design documentation.*

Conclusion. *Stated that the causes of failures and malfunctions of the CCM equipment are violations of the technology and maintenance of machinery equipment. Established that the determining condition for the accuracy of the design parameters of the caster is the relative difference in the curvature of the conjugated arc sections forming the technological axis of the stream. When aligning the CCM equipment, it is necessary to ensure the alignment of the curvature centers provided that the curvature values equal, to minimize their relative difference.*

Keywords: *CCM, technological axis, position monitoring, equipment alignment, curvature radius.*

Сведения об авторах

А.Л. Сотников
SPIN-код: 5203-7480
Author ID: 623331
Researcher ID: P-4344-2015
ORCID iD: 0000-0002-4537-858X
Телефон: +380 (71) 301-98-70
Эл. почта: 0713019870@mail.ru

Л.П. Мироненко
Телефон: +380 (71) 430-72-63
Эл. почта: leonid.mironenko@list.ru

С.А. Руссиян
SPIN-код: 5372-5120
Телефон: +380 (71) 375-88-25
Эл. почта: st_russ@mail.ru

Д.В. Ильченко
SPIN-код: 6622-5851
Телефон: +380 (71) 327-57-84
Эл. почта: daria.mahp@gmail.com

Статья поступила 14.03.2018 г.
© А.Л. Сотников, Л.П. Мироненко, С.А. Руссиян, Д.В. Ильченко, 2018
Рецензент д.т.н., проф. С.П. Еронько

УДК 622.6: 621.43.068.4

В.О. Гутаревич /к.т.н./
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)
К.А. Рябко /к.т.н./, Е.В. Рябко
ГОО ВПО «Донецкий институт железнодорожного транспорта» (Донецк)

ПРОБЛЕМЫ И НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГОРНО-ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН С ДИЗЕЛЬНОЙ УСТАНОВКОЙ

В горных выработках при использовании двигателей внутреннего сгорания необходимая энергия вырабатывается за счет сжигания дизельного топлива. В процессе сжигания топлива выделяются продукты сгорания, содержащие значительное количество вредных веществ. Количество вредных веществ в отработавших газах дизельных двигателей шахтных локомотивов строго регламентируется. Приведены предельно допустимые концентрации вредных веществ в подземных выработках. Рассмотрены проблемы и направления совершенствования экологических характеристик горно-транспортных машин с силовой дизельной установкой. Определены основные способы снижения эмиссии вредных веществ с отработавшими газами.

Ключевые слова: *горно-транспортная машина, силовая дизельная установка, дизельное топливо, отработавшие газы, предельно допустимые концентрации, вредные вещества, экологические показатели.*

Постановка проблемы

Производственная деятельность горно-транспортных машин с силовой дизельной установкой оказывает воздействие на окружающую среду при всех видах добычи полезных ископаемых. В горных выработках при использовании двигателей внутреннего сгорания необходимая энергия вырабатывается за счет сжигания дизельного топлива. В процессе сжигания топлива выделяются продукты сгорания, содержащие значительное количество вредных веществ. Основными токсичными компонентами отработавших газов силовых дизельных установок являются окись углерода CO и оксиды азота NO и NO_x. Оксиды азота представляют наибольшую опасность, относительная токсичность CO=1, оксида азота NO_2=41,1 [1].

Применение дизельных локомотивов в горных выработках обусловлено рядом особенностей эксплуатации. Для подземной горной выработки характерны замкнутость пространства и выхлопные газы силовой дизельной установки, которые необходимо разряжать за счет подачи большого количества воздуха. Расход воздуха, который требуется для проветривания горной выработки в шахтах Донбасса и России, в 2,5-4 раза выше, чем за рубежом [2].

Согласно ряду нормативных документов, количество вредных веществ в отработавших газах строго регламентируется, также особые требования предъявляются к конструкции силовой установки горно-транспортной машины.

На основании вышеизложенного особую актуальность представляют исследования, направленные на совершенствование экологических характеристик горно-транспортных машин с силовой дизельной установкой путем снижения токсичности отработавших газов применительно для угольных шахт.

Анализ последних исследований и публикаций

Анализ технической литературы показывает, что в настоящее время силовые дизельные установки находят все большее применение среди горно-транспортных машин, которые используются на шахтных локомотивах, карьерных тепловозах, автосамосвалах и экскаваторах, подвесных монорельсовых дорогах [3-6]. Основными поставщиками локомотивов для горнодобывающей промышленности являются ОАО «Дружковский машиностроительный завод», ЗАО ПКФ «Амплитуда», ООН НПП «Энергия», ОАО «Александровский машиностроительный завод», Ясногорский машиностроительный завод; международные компании Ferrit (Чехия), Becker (Германия), Sharf (Германия) [7-11].

Несмотря на значительный объем исследований в области создания и повышения эффективности работы силовых дизельных установок горно-транспортных машин, обоснованиям параметров и режимам работы уделено недостаточное внимание. Также необходимо учитывать тяжелые условия эксплуатации силовой дизель-

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

ной установки горно-транспортной машины и влияние множества факторов на выброс токсичных веществ с отработавшими газами дизельных двигателей. Данные факторы можно выделить в две основные подгруппы: конструкционные и эксплуатационные [12]. Эксплуатационные факторы в большей степени оказывают влияние на содержание вредных веществ в отработавших газах.

Цель (задачи) исследования

Целью настоящей работы является исследование проблем и направлений снижения концентрации вредных выбросов с отработавшими газами дизельных локомотивов в атмосферу подземных горных выработок.

Основной материал исследования

Горно-транспортные машины с силовой дизельной установкой должны соответствовать требованиям, предъявляемым к оборудованию в рудничном взрывозащищенном исполнении. На транспортных машинах с дизельным приводом должны устанавливаться малотоксичные взрывозащищенные дизельные двигатели. Для привода должны использоваться взрывозащищенные четырехтактные дизельные двигатели с двухступенчатой камерой сгорания и минимально возможным количеством выделяемых при работе газов [13]. Кроме того, нормами безопасности на транспортные машины с дизельным приводом для угольных шахт РД 05-311-99, рекомендуется при конструировании машин отдавать предпочтение дизельным двигателям с отключением части цилиндров (то есть тем конструкциям двигателя и топливной аппаратуры, которые на холостом ходу и при низкой нагрузке обеспечивают работу только части цилиндров в целях достижения меньшего объема выхлопных газов и их меньшей токсичности).

Воздух в действующих подземных выработках при работе горно-транспортных машин с силовой дизельной установкой не должен содержать вредных веществ больше предельно допустимых концентраций, в том числе суммарных оксидов азота (в пересчете на NO_2) – более 5 мг/м^3 (0,00025 %, 2,5 ppm по объему) и диоксида азота NO_2 – 2 мг/м^3 (0,0001 %, 1 ppm по объему), оксида углерода – более 20 мг/м^3 (0,0017 %, 17 ppm по объему). В выработки и на участки, по которым проходят маршруты движения горно-транспортных машин с дизельной установкой, должен подаваться свежий воздух в количестве, обеспечивающем разбавление вредных компонентов выхлопных газов до ПДК, но не менее 5 куб. м/мин на 1 л.с. номинальной мощности дизельных двигателей. В шахтах допускается эксплуатация дизельных двигателей, в неразбавленных выхлопных газах которых на любом допускаемом режиме после газоочистки концентрация оксида углерода не превышает 0,08 % (800 ppm) и оксидов азота в пересчете на NO_2 – 0,07 % (700 ppm) по объему [14].

В связи с вышеизложенным, дизелевозы оборудуются сложными техническими системами очистки выхлопных газов, также применяются методы их охлаждения и разжижения. Анализ методов и путей снижения экологического воздействия дизелей на окружающую среду горных выработок показал, что в настоящее время основными являются нижеперечисленные направления.

Работа на обедненной смеси. Большинство дизелевозов работают на топливовоздушной смеси с высоким коэффициентом избытка воздуха (отношение количества воздуха к топливу находится в данных пределах 15:1 – 20:1). Такой метод позволяет снизить эмиссию токсичных веществ с продуктами сгорания, но существенно снижает к.п.д. силовой дизельной установки горно-транспортной машины (далее СДУ ГТМ).

Изменение угла опережения впрыска топлива (УОВТ). Величина установленного угла опережения впрыска существенно влияет на токсичность отработавших газов, расход топлива и шумность работы дизеля. Изменением угла можно добиться снижения вредных веществ в отработавших газах, уменьшение УОВТ на 4-5° от стандартного приводит к снижению концентрации CO до 35 %, а увеличение – к росту концентрации до 20 %. Эффективность данного мероприятия существенно зависит от режима работы: уменьшение УОВТ приводит к снижению концентрации CO при работе дизеля горно-транспортной машины в диапазоне малых нагрузок и, наоборот, к увеличению – при работе дизеля в области номинальных нагрузок. Применение такого способа требует модернизации СДУ ГТМ специальным устройством, позволяющим автоматически менять УОВТ в зависимости от нагрузки.

Использование рециркуляции отработавших газов. Данный способ подразумевает снижение доли свободного кислорода в свежем заряде цилиндра, что приводит к уменьшению температуры и скорости сгорания топлива. Снижение данных показателей ухудшает условия образования NO, также понижается выбрасываемая масса отработавших газов на величину перепускаемых. Недостатком количественного изменения свежего заряда является негативное влияние на технико-экономические показатели дизеля горно-

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

транспортной машины. При излишнем перепуске отработавших газов увеличивается расход топлива с одновременным падением эффективной мощности дизеля. Соответственно, количество перепускаемых газов для каждой марки силовой установки подбирается индивидуально, исходя из условий минимального ухудшения технико-экономических показателей дизелей и режимов работы. В целом рециркуляцию предпочтительно применять на горно-транспортных машинах, у которых преобладают режимы холостого хода и малые нагрузки. Рассмотренный способ практически нереализуем на СДУ ГТМ подземных выработок. Рециркуляцию отработавших газов целесообразно применять на горно-транспортных машинах с силовой дизельной установкой при карьерных работах.

Применение различных устройств, предназначенных для снижения токсичности отработавших газов путем восстановления NO_x и использования полученного кислорода для дожигания CO и несгоревших углеводородов. Несмотря на сложность и относительно большую стоимость, этот метод нашел широкое распространение на горно-транспортных машинах, в первую очередь на подземных дизельных локомотивах. Параллельно с каталитическими нейтрализаторами применяется система охлаждения и увлажнения отработавших газов, приведенная на рисунке 1 [11].

Применение электрофизических методов очистки газов. Принцип электрофизической очистки заключается в воздействии электроразрядной энергии на струю отработавших газов, вследствие чего происходит существенное снижение эмиссии CO и NO_x. Также возможно применение электрофильтра-нейтрализатора вместо серийного глушителя [15]. Данный способ весьма перспективен, но требует глубоких исследований возможности его применения на дизельных горно-транспортных машинах в подземных выработках.

Отключение части цилиндров при работе дизельного подземного локомотива на малых нагрузках. Данное мероприятие подразумевает оборудование и разработку дизельных двигателей для рудничных дизелевозов с системой управления цилиндрами. Система позволяет отключать часть цилиндров при работе на холостом ходу или режимах с малой нагрузкой (стоянка в тупике, ожидание погрузки/разгрузки, движение по уклону). Применение такого способа позволит значительно снизить расход топлива и эмиссию вредных веществ с отработавшими газами.

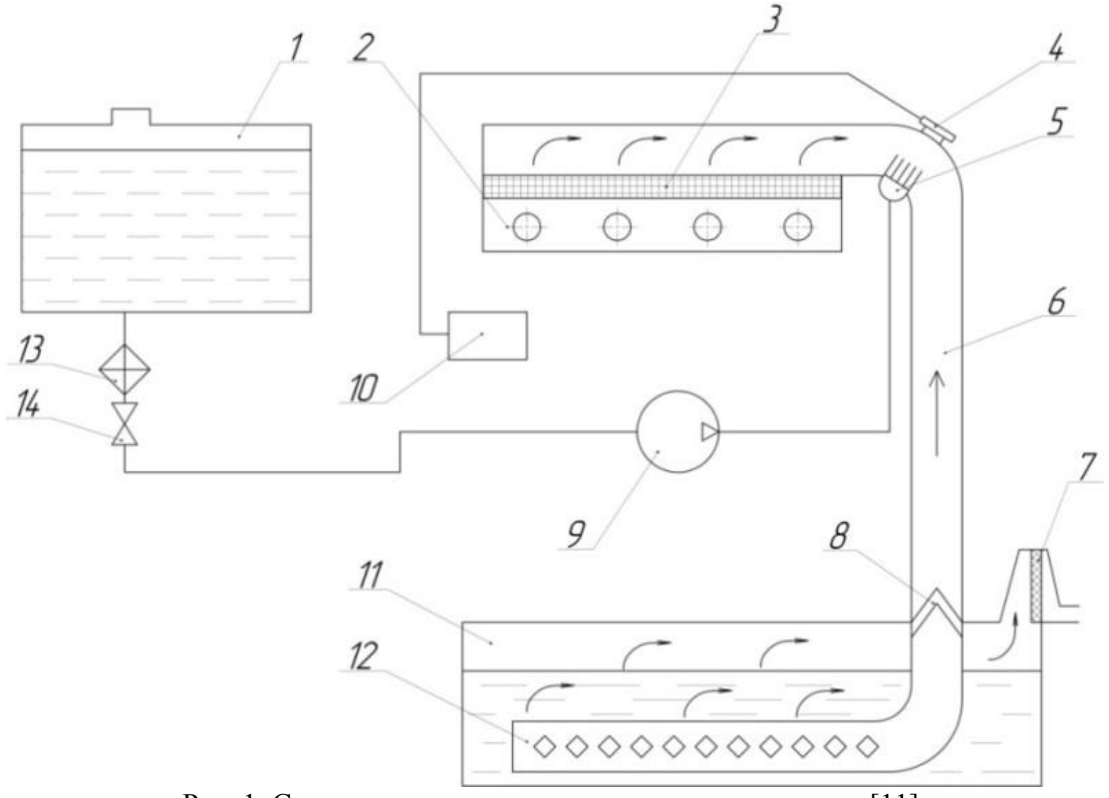


Рис. 1. Схема очистки и охлаждения выхлопных газов [11]:
1 – водяной бак; *2* – выхлопной коллектор; *3* – каталитический нейтрализатор; *4* – датчик; *5* – форсунка; *6* – вертикальная труба; *7* – пламегасительные решетки; *8* – клапан; *9* – водяной оросительный насос; *10* – устройство аварийной остановки; *11* – кондиционер; *12* – горизонтальная труба; *13* – клапан; *14* – вентиль

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Применение химических добавок к топливу (присадок), водотопливных эмульсий и подача воды во впускной коллектор [16-18]. Эффективность применения присадок и водотопливных эмульсий многократно подтверждалась различными исследованиями. Их применение улучшает выходные параметры силовых дизельных установок, существенно снижает эмиссию вредных веществ в отработавших газах. Применение присадок не требует дополнительной аппаратуры и легко реализуемо в условиях экипировки СДУ ГТМ.

Использование альтернативных низкотоксичных видов топлив (диметилового эфира, природного или сжиженного газа, топливных элементов). В качестве дизельного топлива можно использовать диметиловый эфир [19]. Это топливо может кардинально решить проблему использования дизельных двигателей в подземных условиях. Для его применения требуется разработка дополнительной топливной аппаратуры наряду со штатной для серийных двигателей. Диметиловый эфир CH_3OCH_3 – экологическое топливо нового поколения, которое не содержит серу, эмиссия оксидов азота с выхлопными газами до 80 % меньше, чем у нефтяных топлив. Цетановое число диметилового дизеля более 55, у нефтяного – до 53. Основным недостатком применения CH_3OCH_3 в качестве топлива для дизельных горно-транспортных машин является его недоступность и низкая температура вспышки: -41 °С.

Одним из способов снижения токсичности отработавших газов и экономии дизельного топлива является *применение газодизелей* – двигателей внутреннего сгорания с двухтопливной системой питания: дизельное топливо – газ. Принцип работы газодизеля заключается в уменьшении количества подаваемого в цилиндры дизельного топлива до 40 %, а во впускной ресивер вместе с воздухом подается до 40 % природного или сжиженного газа, которые до впуска в цилиндр образуют гомогенную топливовоздушную смесь. Развиваемая мощность остается на том же уровне, что и при работе на дизельном цикле. Сгорание топлива в цилиндрах происходит более равномерно, дымность отработавших газов снижается до 50 %. Данный способ хорошо зарекомендовал себя на автомобильных дизельных двигателях. Также известен ряд исследований, посвященных данному вопросу [20-22]. Основной проблемой является разработка комплекса мероприятий, который бы обеспечил безопасность использования природного газа в качестве топлива на СДУ ГТМ в подземных выработках.

Главный конкурент жидких углеводородных топлив – *водород*, его применение характеризуется высокими энергетическими и экологическими характеристиками. В Российской Федерации и за рубежом уже эксплуатируются транспортные средства, использующие водород в жидком виде или в составе топливных элементов [23]. Рабочий процесс дизельно-водородного двигателя характеризуется увеличением степени сгорания топливовоздушной смеси, что существенно снижает эмиссию вредных веществ: CO – в 9 раз, NO_x – в 7 раз, CH – в 2 раза.

Существенными недостатками использования водорода в качестве моторного топлива остаются его дороговизна, сложность производства, водородное охрупчивание сталей. Смесь водорода с воздухом горюча и взрывоопасна, что, в свою очередь, усложняет применение H_2 в качестве топлива на СДУ ГТМ. Применение водородно-кислородных топливных элементов с непосредственным преобразованием энергии химической реакции в электрическую расширяет возможности применения водорода в качестве источника энергии.

Выводы

На основании проведенного анализа можно сделать вывод, что универсального способа снижения токсичности отработавших газов, удовлетворяющего экологическим требованиям, для дизельных горно-транспортных машин нет. Если использовать только методы воздействия на рабочий процесс дизеля, которые снижают эмиссию NO_x, то можно получить увеличение выбросов других токсичных компонентов. Применение средств очистки и охлаждения отработавших газов требует постоянного обслуживания каталитических нейтрализаторов, пламегасительных решеток, кондиционеров.

В качестве рекомендаций по совершенствованию экологических характеристик горно-транспортных машин с силовой дизельной установкой можно выделить следующее:

– при разработке комплекса устройств нейтрализации или очистки отработавших газов для горных транспортных средств с силовой дизельной установкой необходимо учитывать тип дизеля, режим его работы, тип топлива и состав его примесей, назначение тяговой единицы;

– наиболее приемлемыми методами снижения вредных компонентов отработавших газов шахтных дизельных локомотивов являются: нейтрализаторы с катализаторами дожигания углеводородов; применение альтернативных низкотоксичных видов топлив; переход на газодизельный цикл; использование топливных присадок; отключение части цилиндров при работе дизеля на малых нагрузках.

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Учет данных рекомендаций позволит существенно снизить эмиссию вредных веществ дизельными тяговыми средствами в подземной горной выработке.

Список литературы

1. Рябко, К.А. Воздействие двигателей внутреннего сгорания на окружающую среду / К.А. Рябко, Е.В. Рябко // Сборник научных трудов ДонИЖТ. – 2016. – № 41. – С. 55-60.
2. Шахтный подземный транспорт: Справочное издание. – В 2-х т. – Шахтный локомотивный и рельсовый транспорт. / Ю.Ф. Бутт и др. // Под общ. ред. Б.А. Грядущего. – Т.1. – Донецк: ВИК, 2009. – 481 с.
3. Тарасов, В.М. Технология работы дизель-гидравлических локомотивов и навесного оборудования в горных выработках / В.М. Тарасов // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2010. – № 2. – С. 155-165.
4. Becker, F. Integriertes Konzept zur Kollisionsvermeidung zwischen Personen und Fahrzeugen im Untertagebergbau / F. Becker, S. Becker // Glückauf. – 2011. – Vol.147. Iss.1/2. – P. 20-24.
5. Becker, F. Modernisierung der Logistikkette im polnischen Verbundbergwerk «Borynia-Zofiywka» durch leistungsstarke Transportmittel und ein integriertes Steuerungs- und Kommunikationssystem / F. Becker // Mining+geo. – 2012. – No. 2. – P. 224-230.
6. Теоретические основы и расчеты транспорта энергоемких производств / В.А. Будишевский, А.Я. Грудачев, В.О. Гутаревич [и др.]; под ред. В.П. Кондрахина. – Донецк: ДонНТУ, 2017. – 216 с.
7. Мохельник, П. Чешские взрывозащищенные рудничные дизелевозы / П. Мохельник, П. Коварж // Горная промышленность [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://mining-media.ru/ru/article/transport/1705-cheshskiev-zryvozashchishchennye-rudnichnye-dizelevozy
8. Гнайдинг, Э. Презентация фирмы «СМТ Шарф» и новые разработки. Дальнейшее расширение производственной программы / Э. Гнайдинг // Глюкауф. – 2011. – № 1. – С. 24-27.
9. Презентация шахтного подвесного дизельного локомотива BEVEX 80R // Уголь. – 2010. – № 12. – С. 32-33.
10. Применение тягача мощностью 148 кВт в системах транспорта фирмы Becker-Warkop в горной промышленности // Уголь. – 2010. – № 8. – С. 58-61.
11. Стендовые испытания подвесной монорельсовой дороги 2ДМД с дизельным приводом / В. В. Бухановский [и др.] // Шахтный и карьерный транспорт / Под ред. А.О. Спиваковского. – Москва, 1981. – Вып. 7. – С. 189-193.
12. Рябко, Е.В. Анализ факторов, влияющих на надежность дизельных силовых установок карьерных и рудничных локомотивов / Е.В. Рябко // Вестник Донецкого национального технического университета. – 2017. – № 3 (9). – С. 44-51.
13. Чубаров, Л.А. Нормы безопасности на транспортные машины с дизельным приводом для угольных шахт / Л.А. Чубаров, В.П. Степаненко, И.П. Ремизов и др. // РД-05-311-99. Утверждены постановлением Госгортехнадзора России от 30.09.1999 г. № 71.
14. Чубаров, Л. А. Технические требования по безопасной эксплуатации транспортных машин с дизельным приводом в угольных шахтах / Л.А. Чубаров, В.П. Степаненко, И.П. Ремизов и др. // РД-05-312-99. Утверждены постановлением Госгортехнадзора России от 30.09.1999 г. № 71.
15. Белоусов, В.А. Исследование газодинамического сопротивления электрофильтра-нейтрализатора отработавших газов дизельного двигателя / В.А. Белоусов, А.Н. Карташевич, А.В. Кравец // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. – 2016. – № 3. – С.126-129.
16. Мельник, А.Ю. Влияние воды на характеристики дизельного топлива / А.Ю. Мельник, С.Н. Миникаева, С.Б. Павлов, Х.Э. Харлампиди // Вестник Казанского технологического университета. – 2012. – № 24. – С. 123-125.
17. Деревяго, И. Эколого-экономическая оценка эффективности использования топливных добавок // Вестник АГТУ. – 2016. – №1 (61). – С. 28-33.
18. Джихинто, Г.А. Использование альтернативных топлив как способ снижения уровня токсичности выбросов судовых двигателей внутреннего сгорания / Г.А. Джихинто // Вестник АГТУ. – 2007. – № 6. – С. 146-149.
19. Степаненко, В.П. Перспективы конвертации горных дизельных машин на газовое топливо / В.П. Степаненко // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – № 5. – С. 190-197.
20. Загородских, Б.П. Результаты экологических исследований трактора К-700А, работающего по газодизельному циклу / Б.П. Загородских, В.В. Володин, Е.В. Бебенин // Известия НВ АУК. – 2014. – № 1 (33). – С. 193-196.
21. Савастенко, А.А. Особенности работы топ-

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

ливной аппаратуры газодизеля с внутренним смесеобразованием / А.А. Савастенко, С.А. Казаков, В.В. Харитонов // Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования. – 2004. – № 2. – С. 40-43.

22. Беляев, С. В. Перспективы применения водородных топливных элементов на автомобилях / С.В. Беляев // Resour. Technol. – 2005. – № 5. – С. 6-9.
23. Шугаев, О.В. Обоснование выбора и аргументация использования водородного топливного элемента для автомобиля / О.В. Шугаев, Т.П. Воскресенская // Вестник СибГИУ. – 2016. – № 3 (17). – С. 19-22.

V.O. Gutarevich /Cand.Sci. (Eng.)/
Donetsk National Technical University (Donetsk)
K.A. Ryabko /Cand.Sci. (Eng.)/, E.V. Ryabko
Donetsk Institute of Railway Transport (Donetsk)

PROBLEMS AND DIRECTIONS OF IMPROVEMENT OF THE ENVIRONMENTAL PERFORMANCE OF MINE TRANSPORT WITH A DIESEL PLANT

Background. *The problems and directions of improvement of ecological characteristics of mine transport with diesel power plant considered. The main ways to reduce the emission of harmful substances with exhaust gas determined.*

Materials and /or methods*. The use of diesel locomotives in mining is conditioned by a number of features of operation. Underground mining is characterized by closed space and exhaust gases of the diesel power plant, which must be discharged by supplying a large amount of air. The air in the underground workings at work of mine transport machines with a power diesel plant must not contain harmful substances more than maximum permissible concentrations, including total oxides of nitrogen (in terms of NO_2) – more than 5 mg/m^3 (0.00025 %, 2.5 ppm in volume) and nitrogen dioxide NO_2 – 2 mg/m^3 (0.0001 %, 1 ppm in volume), carbon monoxide-more than 20 mg/m^3 (0.0017 %, 17 ppm in volume). Diesel locomotives are equipped with complex technical systems for purification of exhaust gas using methods of their cooling and liquefaction.*

Results. *There is no universal way to reduce the toxicity of exhaust gas that meets environmental requirements for diesel mine transport machines. When using methods to influence the working process of the diesel engine, it is possible to increase emissions of other toxic components. It is recommended to take into account the type of diesel, its mode of operation, the type of fuel and the composition of its impurities, the purpose of the traction unit when developing a set of devices for neutralizing or purification of exhaust gases for mine transport with a diesel power plant.*

Conclusion. *The most acceptable methods for reducing the harmful components of exhaust gases of mine diesel locomotives are neutralizers with catalysts for hydrocarbon afterburning; the use of alternative low-toxic fuels; the transition to a gas-diesel cycle; the use of fuel additives; the shutdown of part of the cylinders when diesel is operated at low loads. Taking into account the above recommendations will reduce the emission of harmful substances by diesel traction means in underground mining.*

Keywords: *mine transport, diesel power plant, diesel fuel, exhaust gas, maximum allowable concentration, harmful substances, environmental performance.*

Сведения об авторах

В.О. Гутаревич
SPIN-код: 6436-6484
Телефон: +380 (62) 301-08-54
Эл. почта: viktor.gutarevich@mail.ru

Е.В. Рябко
SPIN-код: 9216-7256
Телефон: +380 (62) 319-21-76
Эл. почта: evgeniya.ryabko@gmail.com

К.А. Рябко
SPIN-код: 7192-6321
Телефон: +380 (62) 319-04-37
Эл. почта: railroader@yandex.ru

Статья поступила 14.02.2018 г.
© В.О. Гутаревич, К.А. Рябко, Е.В. Рябко, 2018
Рецензент д.т.н., проф. А.П. Кононенко

УДК 621.867.2

В.Н. Скляров
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

ОЦЕНКА ОБОБЩЕННОГО ПОКАЗАТЕЛЯ УРОВНЯ КАЧЕСТВА РОЛИКОВ ЛЕНТОЧНЫХ КОНВЕЙЕРОВ

В статье рассмотрены проблемы повышения уровня качества роликов ленточных конвейеров. Установлено необходимое и достаточное количество частных показателей качества ролика, разработана методика и приведены результаты оценки обобщенного показателя уровня качества основных типов роликов ленточных конвейеров.

Ключевые слова: *конвейер ленточный, частные показатели качества, коэффициент парной корреляции, обобщенный показатель уровня качества.*

Постановка проблемы

На угольных шахтах и открытых карьерах широко используются ленточные конвейеры, в которых для поддержания конвейерной ленты при транспортировании полезного ископаемого и породы используются роликоопоры, составленные из нескольких шарнирно соединенных между собой роликов. На долю роликоопор приходится до 30 % первоначальной стоимости всей конвейерной установки [1]. Ежегодно изготавливают примерно 10 млн. роликов и, тем не менее, потребность в них удовлетворяется на 65-70 %. Всего в эксплуатации находится примерно 40 млн. роликов. За рубежом ежегодно для ленточных конвейеров изготавливается свыше 30 млн. роликов.

Повышение уровня качества и увеличение ресурса роликоопор и шахтных ленточных конвейеров в целом является современной актуальной научной задачей.

Анализ последних исследований и публикаций

Решение проблемы повышения качества горнодобывающей техники зависит в первую очередь от совершенствования методов оценки ее качества, которая должна быть доведена до такого уровня, что давало бы возможность оценивать качество продукции на всех стадиях: проектирования, производства, эксплуатации и ремонта.

В рациональном выборе мероприятий, направленных на повышение качества продукции, важная роль принадлежит количественным методам определения обобщенного показателя уровня качества изделий. Особенно жесткие требования предъявляются к оценке качества горной техники для основных производственных процессов: выемки, транспортирования и переработки полезного ископаемого.

Проблема объективной оценки качества и технического уровня промышленной продукции приобретает в настоящее время первостепенное значение, так как от успешного управления качеством продукции в значительной мере зависит уровень национальной экономики, повышение конкурентоспособности изделий, а также расширение экспорта.

В работе рассмотрены методики оценки качества продукции различных отраслей промышленности: химического машиностроения, изделий угольного машиностроения, горных машин [2], аппаратуры шахтной автоматики [3], а также определения функциональных параметров ленточных конвейеров [4-7].

Большое количество публикаций свидетельствует об актуальности проблемы комплексной оценки совокупности показателей свойств продукции и характеризует значительные трудности, которые стоят на пути создания научно обоснованной методики, применяемой для решения указанного круга задач.

Согласно ГОСТ 15467-70 качество продукции – совокупность свойств продукции, которые обеспечивают ее способность удовлетворять определенные потребности согласно ее назначению. Количественной характеристикой этой совокупности является обобщенный показатель уровня качества ($П_j$) – комплексный показатель уровня качества *j*-го типа ролика ленточного конвейера.

В ГОСТ 16431-70 указано, что оценкой уровня качества продукции является совокупность операций, которая включает выбор номенклатуры показателей качества, определение их численных значений, а также значений базовых и относительных показателей с целью обоснования наилучших решений, реализованных при управлении качеством продукции.

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Цель (задачи) исследования

Целью работы является оценка обобщенного показателя уровня качества основных типов серийных и опытных роликов, применяемых на угольных предприятиях.

Основной материал исследования

Для достоверности и объективности оценки обобщенного показателя уровня качества роликов необходимо рассматривать как можно большую совокупность типов и моделей роликов, так как из этой совокупности выбирают значения базовых показателей эталона.

На основании проведенных исследований [2] предложено при определении обобщенного показателя уровня качества, прежде всего, выбрать функциональный параметр изделия (λ_j) из условия функционального его назначения.

Ролик и роликоопора являются составной частью ленточного конвейера, функциональным назначением которого является транспортирование определенного объема груза за определенный промежуток времени.

К методике оценки обобщенного показателя уровня качества ролика ленточного конвейера предъявляются повышенные требования:

– иметь функциональный подход к оценке уровня качества;

– учитывать условия эксплуатации;

– позволять оценивать уровень качества роликов ленточных конвейеров разных типов и исполнений;

– исключать субъективность при оценке качества роликов;

– допускать изменение количества показателей качества в зависимости от целей оценки, что особенно важно при сравнении уровней качества отечественных и зарубежных конструкций роликов;

– иметь динамичный эталон с прогрессивными базовыми показателями;

– позволять прогнозировать уровень качества роликов.

В общем случае методика оценки обобщенного показателя уровня качества роликов должна включать:

– выбор функционального параметра ролика (λ_j);

– выбор частных показателей качества (b_{ij});

– определение удельных показателей качества (x_{ij});

– определение доли участия каждого частного показателя в их общей совокупности (m_{ij});

– определение коэффициентов участия частного показателя (φ_{ij});

– определение суммарного значения частных показателей для каждого j-го типа ролика (ψ_j);

– определение обобщенного показателя уровня качества каждого j-го ролика (Π_j).

Согласно [2] в качестве значения функционального параметра изделия рекомендуется принимать один из показателей назначения, например, массу изделия.

На основании проведенных исследований [8-10] в качестве функционального параметра j-го типа ролика ленточного конвейера принимаем массу перевезенного полезного ископаемого за время, равное ресурсу ролика до первого капремонта.

Функциональный параметр ролика можно определить по формуле:

$$(\lambda_j)=Q\cdot T, \qquad (1)$$

где Q – теоретическая производительность конвейера, т/ч; T – ресурс до первого капитального ремонта, ч.

При равной производительности конвейера функциональный параметр будет выше у ролика с большим ресурсом.

При выборе необходимого и достаточного количества показателей для оценки обобщенного показателя уровня качества роликов ленточных конвейеров были отобраны из государственных и отраслевых стандартов, технических условий, отраслевых методик и других источников следующие параметры роликов ленточных конвейеров (b_{ij}):

b_1 – диаметр обечайки ролика, D, м;

b_2 – ресурс ролика до первого капремонта, T, ч;

b_3 – сила сопротивления вращению ролика, F, Н;

b_4 – величина износа подшипника ролика после испытаний, μ, мм;

b_5 – длина ролика, L, м;

b_6 – коэффициент трения в подшипнике ролика, f_{mp};

b_7 – масса ролика, m, кг;

b_8 – скорость вращения ролика v, об/мин, где i – номер частного показателя ролика; j – номер оцениваемого типа ролика.

Для статистического анализа данных о показателях роликов ленточных конвейеров использовались подпрограммы «Статистика» из Пакета научных программ, которые входят в математическое обеспечение ЭВМ. Исследовались статистические связи между функциональным параметром (λ_j) ролика и его параметрами (b_{ij}), а также между каждыми двумя параметрами (b_{ij}). Коэффициент парной корреляции определялся по формуле:

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

$$r_{b_i;b_{i+1}} = \frac{\sum_{j=1}^{m}\left(b_{ij} - \overline{b_{ij}}\right)\left(b_{i+1,j} - \overline{b}_{i+1,j}\right)}{\sqrt{\sum_{j=1}^{m}\left(b_{ij} - \overline{b_{ij}}\right)^2 \cdot \sum_{j=1}^{m}\left(b_{i+1,j} - \overline{b}_{i+1,j}\right)^2}}, \quad (2)$$

где m – количество одновременно оцениваемых роликов; $\overline{b_{ij}}$, $\overline{b}_{i+1,j}$ – среднее значение анализируемых показателей b_{ij} и $b_{i+1,j}$.

Коэффициент парной корреляции ($r_{b_i;b_{i+1}}$) представляет собой меру тесноты линейной связи между двумя параметрами. Связь между параметрами отсутствует или отличная от линейной, если коэффициент корреляции равняется нулю. Чем выше по абсолютной величине коэффициент корреляции, тем теснее линейная связь.

Статистическая значимость коэффициентов парной корреляции определялась при уровне значимости α=0,05 (доверительная оценка 0,95) и числе степеней свободы $f=m-2=32$ (m=32 – количество рассмотренных роликов). При этом критическое значение коэффициентов парной корреляции $r_{крит}$=0,210.

Линейная связь между параметрами считалась статистически значимой при полученном значении коэффициента корреляции больше значения критического коэффициента корреляции: $\left|r_{b_i;b_{i+1}}\right| \geq r_{крит}$ [2].

Для удобства изучения результаты корреляционного анализа представлены графически в виде многоугольника – графа, вершинами которого являются рассмотренные параметры роликов, а отрезками прямых, которые соединяют вершины, – статистически значимые линейные связи между параметрами (рис. 1).

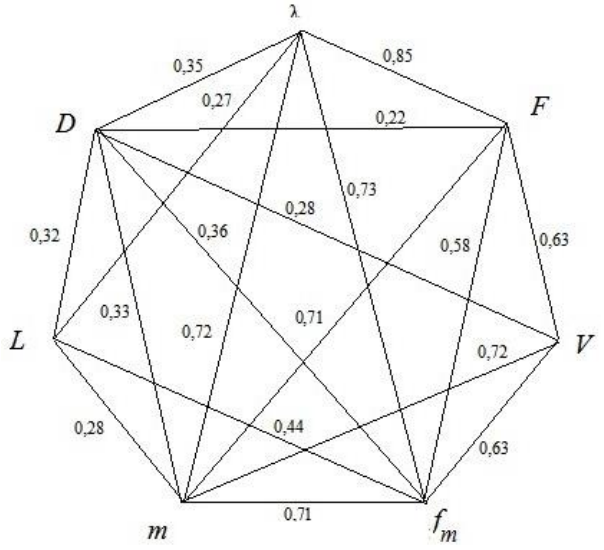


Рис. 1. Граф значимых корреляционных связей между параметрами ленточных конвейеров

Между функциональным критерием (λ_j) и параметрами ролика ленточного конвейера (D, L, T, F, m, f_{mp}, μ, V) существует статистически значимая линейная связь. Статистически значимая линейная связь между вышеперечисленными параметрами ролика ленточных конвейеров, а также отсутствие между параметрами корреляции, близкой к функциональной, свидетельствует о том, что эти параметры могут быть приняты как единичные (частные) показатели качества роликов.

В соответствии с методикой обобщенный показатель уровня качества ролика определялся с использованием удельных показателей (x_{ij}), полученных отношением частных показателей (b_{ij}) к функциональному критерию ролика ленточного конвейера (λ_i):

$$x_{ij} = \frac{b_{ij}}{\lambda_i}. \quad (3)$$

С физической точки зрения удельные показатели представляют собой долю наименьшего реально достигнутого значения, приходящегося на единицу функционального параметра j-го ролика.

Для определения базовых значений удельных показателей, рассчитанных по формуле (3), значения удельных показателей (x_{ij}) заносят в таблицу-матрицу (4):

$$\left\{x_{ij}\right\} = \begin{vmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{i1} & \cdots & x_{n1} \\ x_{12} & x_{22} & \cdots & x_{i2} & \cdots & x_{n2} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ x_{1j} & x_{2j} & \cdots & x_{ij} & \cdots & x_{nj} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ x_{1m} & x_{2m} & \cdots & x_{1m} & \cdots & x_{nm} \end{vmatrix}, \quad (4)$$

где n – количество частных показателей, принятых для оценки качества ролика; m – число типов роликов в рассмотренной совокупности.

За значение базовых удельных показателей ($x_{iб}$) принимают минимальные значения удельных показателей, которые выбирают из каждой колонки таблицы-матрицы:

$$\sum\left\{x_{iб}\right\} = min\left\{x_{ij}\right\},$$

где $\{x_{iб}\}$ – динамическая модель фиктивного эталонного ролика, которая имеет наиболее высокие свойства, уже достигнутые в разных типах роликов.

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Уровень качества *j*-го ролика по частным показателям:

$$\tau_{ij} = \frac{x_{i\delta}}{x_{ij}} \le 1.$$

Для базовой конструкции ролика:

$$\tau_{ij} = \frac{x_{i\delta}}{x_{i\delta}} = 1.$$

Для определения комплексного показателя уровня качества определяют доли участия (m_{ij}) каждого частного показателя в их общей сумме при n избранных показателях и коэффициент участия (φ_{ij}) каждого частного показателя качества:

$$m_{ij} = \frac{\tau_{ij}}{\sum_{i=1}^{n} \tau_{ij}}; \quad m_{i\delta} = \frac{\tau_{i\delta}}{\sum_{i=1}^{n} \tau_{i\delta}} = \frac{1}{n};$$

$$\varphi_{ij} = \frac{1 - m_{i\delta}}{1 - m_{ij}}; \quad \varphi_{i\delta} = \frac{1 - m_{i\delta}}{1 - m_{i\delta}} = 1.$$

Суммарное значение частных показателей качества *j*-го ролика (ψ_j) с учетом коэффициентов участия определяют по формуле:

$$\psi_j = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (\tau_{ij}\varphi_{ij})^2}; \quad \psi_{\delta} = \sqrt{n}.$$

Обобщенный показатель уровня качества *j*-го ролика (Π_j):

$$\Pi_j = \frac{\psi_j}{\psi_{\delta}} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (\tau_{ij}\varphi_{ij})^2}.$$

Для выполнения оценки обобщенного показателя уровня качества роликов принят участковый ленточный телескопический конвейер 1Л80 с техническими параметрами: скорость ленты V=1,6 м/с; диаметр роликов – 127 мм, максимальная производительность Q=330 т/ч.

По предложенной методике выполнена оценка обобщенных показателей уровня качества четырех типов роликов. Исходные данные, используемые в расчете, представлены в табл. 1.

В табл. 2 приведены результаты определения суммарного значения частных показателей (ψ_j) и обобщенных показателей уровней качества (Π_j) по каждому типу ролика, полученные согласно предлагаемой методике оценки.

Из табл. 2 следует, что минимальное значение Π_j, равное 0,426, относится к роликам с подшипниками качения, а наибольшее 0,912 – для роликов с металлофторопластовыми подшипниками скольжения с бочкообразной формой корпуса.

Полученные результаты оценки обобщенного показателя уровня качества доказывают целесообразность применения в роликах ленточных конвейеров металлофторопластовых подшипников скольжения с бочкообразной формой корпуса.

Табл. 1. Исходные данные для оценки обобщенного показателя уровня качества роликов

№ п/п	Тип ролика	Исходные данные			
		T, час	F, Н	μ, мм	λ_i, тыс.т
1	С шариковыми подшипниками качения	1500	6,92	0,070	330
2	С керамическими подшипниками	1500	7,05	0,060	495
3	С фторопластовыми подшипниками цилиндрической формы корпуса	8000	8,45	0,062	2640
4	С фторопластовыми подшипниками бочкообразной формы корпуса	10000	6,45	0,067	3300

Табл. 2. Обобщенные показатели уровня качества роликов

№ п/п	Тип ролика	Значения показателей уровня качества		
		ψ_{ij}	ψ_{δ}	Π_j
1	С шариковыми подшипниками качения	0,852	2,0	0,426
2	С керамическими подшипниками	1,123	2,0	0,561
3	С фторопластовыми цилиндрическими подшипниками	1,500	2,0	0,750
4	С фторопластовыми подшипниками бочкообразной формы	1,824	2,0	0,912

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Выводы

В результате проведенных исследований разработана методика оценки обобщенного показателя уровня качества роликов ленточных конвейеров, которая имеет функциональный подход, исключает элемент субъективности при выборе эталона, разрешает оценивать уровень качества изделия по любому числу показателей качества.

Установлен функциональный параметр ролика ленточного конвейера, который представляет собой объем полезного ископаемого, перевезенный конвейером по роликам за промежуток времени, равный ресурсу ролика до первого капитального ремонта.

Получены первые оценки обобщенного показателя уровня качества роликов. В результате определено, что для роликов с подшипниками качения уровень качества составляет 0,426, а для роликов с металлофторопластовыми подшипниками скольжения с бочкообразной формой корпуса – 0,912.

Список литературы

1. Сидоров, Ю.П. Ролики ленточных конвейеров: обзор / Ю.П. Сидоров. – М.: ЦНИИТЭИтяжмаш, 1990. – 37 с.
2. Солод, Г.И. Методика оценки качества горных машин / Г.И. Солод [и др.] // Научные предпосылки создания высокопроизводительных комплексно-механизированных шахт с вычислительно-логическим управлением; под ред. В.И. Солода. – М.: МГИ, 1974. – С. 162-166.
3. Оценка уровня качества аппаратуры шахтной автоматики // Под общ. ред. А.Ф. Бородкина. – М.: Недра, 1974. – 177 с.
4. Furmanik, K. J. Analysis of load application on idler roller bearing of belt conveyor in different dynamic models / K. J. Furmanik // Journal of Friction and Wear. – 2009. – Vol. 30. Iss. 2. – P. 142-147.
5. Yuan, X.Q. Analysis and Design of the Roller for Belt Conveyor Based on ANSYS / X.Q. Yuan, S.Y. Yang, Q.Y. Niu // Advanced Materials Research. – 2014. – Vol. 1027. - P. 315-319.
6. Fedorko, G. The Calculation of Force Effects of a Conveyor Belt of the Pipe Conveyor to Forming Rollers by FEM / G. Fedorko, V. Molnár, P. Michalik // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 806. – P. 181-186.
7. Теоретические основы и расчеты транспорта энергоемких производств : учеб. пособие для вузов / В.А. Будишевский [и др.]; под общ. ред. В.П. Кондрахина. – 2-е изд., перераб. – Донецк: ГОУВПО «ДонНТУ», 2017. – 216 с.
8. Скляров, В.Н. Ролик ленточных конвейеров нового технического уровня повышенной долговечности и ремонтопригодности / В.Н. Скляров // Сборник трудов XVII Международной научно-технической конференции «Горная энергомеханика и автоматика», г. Донецк, 21-23 ноября 2017 г. – Донецк: ДонНТУ, 2017. – С. 68-75.
9. Скляров, В.Н. Результаты испытаний роликов ленточных конвейеров повышенной долговечности / В.Н. Скляров // Сборник трудов XXIV международной научно-технической конференции «Машиностроение и техносфера XXI века», г. Севастополь, 11-17 сентября 2017 г. – Донецк: ДонНТУ, 2017. – С. 233-236.
10. Скляров, В.Н. Разработка ролика шахтных ленточных конвейеров повышенной долговечности и ремонтопригодности / В.Н. Скляров // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2018. – № 2. – С. 194-200.

V.N. Sklyarov

Donetsk National Technical University (Donetsk)

EVALUATION OF THE GENERALIZED QUALITY LEVEL INDICATOR OF BELT CONVEYOR ROLLERS

Background. *The paper considers the problem of improving the quality level of the belt conveyor rollers, which depends primarily on the excellence of methods for its evaluation. The objective of the paper is to develop effective methods and evaluate the generalized indicator of the quality level of belt conveyor rollers of different types and designs.*

Materials and/or methods. *The author carried out the analysis of methods of assessing product quality in various industries. The method for evaluation of the generalized quality level indicator of the rollers of belt conveyors proposed, taking into account the functional purpose of the product, admitting the change in the number of partial indicators, allowing for the use of the dynamic standard with progressive baseline indicators.*

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Results. *Using the proposed method, the evaluation made of the generalized indicators of the quality level of four types of belt conveyor rollers: rollers with rolling bearings; rollers with metal-ceramic sliding bearings; rollers with metal-fluoroplastic sliding bearings of cylindrical and barrel-shaped bearing housing. Found that the rollers with rolling bearings have a generalized indicator of quality level 0.426, while the rollers with metal-fluoroplastic sliding bearings of cylindrical and barrel-shaped bearing housing – 0.912.*

Conclusion. *On the basis of the results of evaluation of the generalized indicator of the quality level, the expediency of the use of metal-fluoroplastic sliding bearings instead of rolling bearings in the rollers of belt conveyors justified.*

Keywords*: belt conveyor, partial quality indicators, pair correlation coefficient, the generalized indicator of quality level.*

Сведения об авторе
В.Н. Скляров
Телефон: +380 (62) 301-08-54
Эл. почта: vladimirnikol777@mail.ru

Статья поступила 26.02.2018 г.
© В.Н. Скляров, 2018
Рецензент д.т.н., проф. О.Е. Шабаев



ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

УДК 621.316.92

М.П. Дергилёв, /к.т.н./, С.Н. Ткаченко /к.т.н./
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УСЛОВИЙ РАБОТЫ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ С ИЗОЛИРОВАННОЙ И РЕЗОНАНСНО-КОМПЕНСИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ В УСЛОВИЯХ СИЛЬНОЙ ИЗНОШЕННОСТИ ИЗОЛЯЦИИ

В работе представлены результаты исследования перенапряжений при дуговых замыканиях фазы на землю в электрических сетях с изолированной и резонансно-компенсированной нейтралью. Показано, что по мере ухудшения технического состояния изоляции в сети появляются большие перекосы напряжения по фазам, что приводит к существенному увеличению кратности этих перенапряжений. Предложено схемное решение, практическая реализация которого позволит симметрировать сеть, снизить величину перенапряжений и продлить таким образом срок службы изношенного электрооборудования.

***Ключевые слова**: электрическая сеть, смещение нейтрали, кратность перенапряжений, ограничение.*

Постановка проблемы

В настоящее время в условиях постоянно ухудшающегося технического состояния распределительных сетей среднего класса напряжения и отсутствия средств на замену или качественный ремонт изношенного электрооборудования все сильнее обостряется проблема надежности электроснабжения потребителей электрической энергии. Как отмечалось в [1-7], в сложившейся обстановке эффективное решение проблемы надежности работы распределительных сетей с изолированной и резонансно-компенсированной нейтралью, работающих, как известно, в весьма сложных эксплуатационных условиях, следует искать в комплексном подходе к решению этой сложной задачи. С одной стороны, следует по возможности осуществлять замену полностью исчерпавшего свой ресурс электрооборудования, а с другой – необходимо создать условия для продления срока службы электрооборудования с ослабленной изоляцией за счет снижения всех негативно воздействующих факторов, обусловленных потоком внутренних перенапряжений и, прежде всего, перенапряжений, связанных с однофазными замыканиями на землю.

Анализ последних исследований и публикаций

Для оценки влияния указанных факторов на параметры схемы замещения изоляции в работе был проведен анализ результатов измерения емкости C_x, $tg\delta$ и R различных по мощности двадцати четырех силовых трансформаторов напряжением 110 кВ и их высоковольтных вводов типа ГБМТ-110 с бумажно-масляной изоляцией. Измерение указанных параметров, как известно, производится при вводе трансформаторов в эксплуатацию после выполнения всевозможных ремонтов, а также периодически в эксплуатации в соответствии с существующими нормативными документами. Исследуемые трансформаторы находились в длительной эксплуатации (в пределах от 23 до 38 лет) семи подстанций 110 кВ ОАО «Донецкоблэнерго» и ОРУ – 110 кВ Углегорской ТЭС. Поскольку параметры анализируемых величин в значительной мере зависят от температуры исследуемых объектов, а в условиях эксплуатации измерения производились при варьировании в широких пределах температуры объектов, то при выполнении анализа параметры исследуемых величин в соответствии с существующими методиками приводились к температуре +20°С.

Одновременно с этим были произведены измерения геометрической емкости трех кабелей с бумажно-пропитанной изоляцией напряжением 6 кВ. Кабели длиной от 540 до 1160 м были проложены в земле с сечением алюминиевых жил 240 мм^2, срок эксплуатации которых на предприятии «Донецкие электрические сети» составил от 25 до 43 лет. Поскольку при прокладке силовых кабелей измерение емкости C_x не нормируется, то для проведения сравнительного

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

анализа динамики изменения параметров исследуемых кабелей АСБ-3х240 за исходную была принята справочная величина этой емкости. Измерение C_x производилось мостовым методом с использованием моста переменного тока типа Р-595.

По результатам проведенного анализа можно заключить, что величина диэлектрических потерь в изоляции даже силовых трансформаторов за время длительной эксплуатации возрастает более чем на порядок, с 0,15-0,2 % до 2,7 %, а в отдельных случаях до 3,6 %. В динамике изменения во времени геометрической емкости силовых трансформаторов и кабелей прослеживается достаточно стабильное ее уменьшение, однако в условиях длительной эксплуатации появляется большая несимметрия емкости по фазам. Причем у кабелей эта несимметрия значительно больше, чем у трансформаторов. Так, если при примерно одинаковом сроке эксплуатации несимметрия емкости у трансформаторов составила в пределах 6-7 % и только в отдельных случаях достигла 12 %, то у кабелей она изменялась в пределах 14-17 %. За длительный период наблюдений при выполнении профилактических испытаний кабельных линий сетей коммунального назначения установлено, что предельное значение сопротивления сквозной проводимости через изоляцию, при которой наступает пробой или перекрытие, колеблется в весьма широких пределах – от десятков килоом до мегаом.

Таким образом, результаты проведенных исследований показали, что вследствие не- идентичности процессов в изоляции каждой из фаз распределительной сети при ее длительной эксплуатации развивается несимметрия емкостной и активной проводимостей через изоляцию.

Цель (задачи) исследования

В связи с изложенным в рассматриваемой работе была поставлена задача провести исследования по оценке влияния процессов старения изоляции как на нормальные эксплуатационные режимы работы электрооборудования, так и на качественные и количественные параметры переходных процессов при дуговых замыканиях фазы на землю в электрических сетях с изолированной нейтралью и компенсацией емкостных токов на землю.

По установившейся практике сети напряжением до 35 кВ включительно имеют изолированною нейтраль. Если в такой сети произойдет дуговое замыкание на землю, то через дугу будет протекать емкостный ток, величина которого определяется емкостью трех фаз сети. Устойчивая дуга однофазного замыкания на землю ведет к термическому разрушению изоляции, перегоранию провода и обычно перебрасывается на междуфазные промежутки, т.е. ведет к междуфазным коротким замыканиям с автоматическим отключением участка сети. По этой причине дуговые замыкания на землю стремятся погасить в начале их возникновения. Для этой цели служит дугогасящая катушка (ДГК), включаемая в нейтраль трехфазной сети. Катушка настраивается в резонанс на суммарную емкость сети на землю (3 $C_ф$).

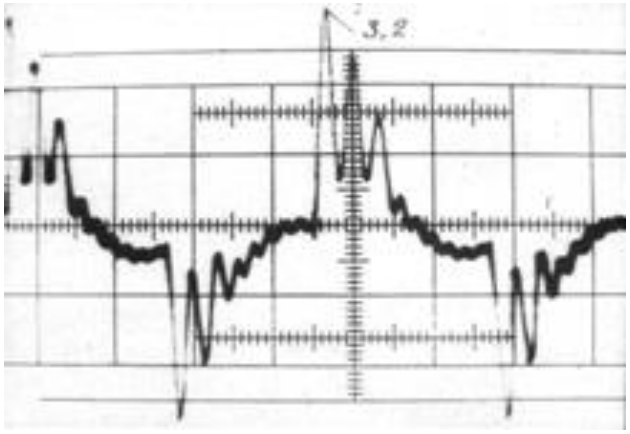
Действие катушки основано на двух факторах. Во-первых, катушка компенсирует ток замыкания на землю до остаточного значения $I_{ост}$ малого по сравнению с током $I_з$ без катушки. Во-вторых, катушка резко снижает скорость восстановления напряжения на дуге, благодаря чему сокращается число повторных зажиганий. Но, как показывает практика, в сложившихся условиях повреждаемость электрооборудования при установке ДГК практически не уменьшается.

Основной материал исследования

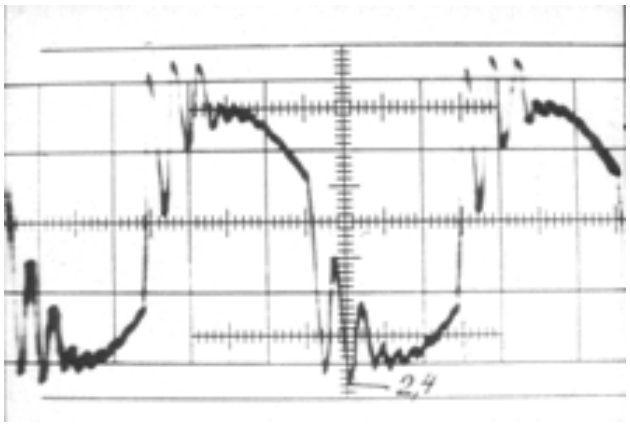
Однофазные замыкания на землю, являясь самым распространенным видом повреждения (до 75-90 % от общего числа нарушений нормальной работы сети), в последние годы, по данным опыта эксплуатации электроустановок горнорудного, промышленного и коммунально-бытового назначения, почти каждое из них сопровождается групповым отключением присоединений и многоместными пробоями изоляции на поврежденной фазе. Повреждаются в основном электродвигатели, кабели и в меньшей мере другое электрооборудование. Обследованиями установлено, что основной причиной повреждений являются дуговые перенапряжения, характеризующиеся, как известно, достаточно большой продолжительностью, высокой кратностью и широтой охвата всей электрически связанной сети.

За многолетний опыт эксплуатации этих сетей и большой объем выполненных исследований накоплен большой научный и экспериментальный материал по электрофизическим основам генерации этих перенапряжений. Показано, что качественные и количественные параметры их в значительной мере определяются емкостью фаз по отношению к земле и междуфазной емкостью, индуктивностью источника питания и трансформаторов, характера нагрузки, сопротивления в месте замыкания фазы на землю и т.д. Для возникновения предельной кратности перенапряжений в сети с заданными параметрами решающее значение имеют: величина мгновенного значения напряжения на поврежденной

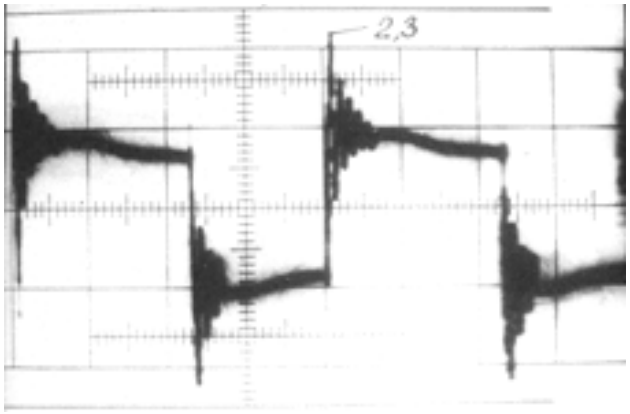
ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org



а



б



в

Рис. 1. Осциллограммы перенапряжений:
а, б – на двух неповрежденных фазах;
в – в нейтрали электрической сети
с изолированной нейтралью при дуговом
замыкании на землю

фазе в момент первичного зажигания дуги, момент погасания дуги и напряжения при повторном и последующих зажиганиях дуги, а также характер процесса восстановления электрической прочности дугового промежутка после гашения дуги.

Характерная осциллограмма этих перенапряжений, полученная на физической модели кабельной сети с двигательной нагрузкой, разработанной и сооруженной в лаборатории ТЭВН кафедры электростанций ДонНТУ, представлена на рис. 1.

Важно подчеркнуть, что при проведении этих исследований с использованием физических и математических моделей за исходное всегда принималось, что сеть транспонирована, симметрична, смещения нейтрали, а значит, перекосов напряжения по фазам нет [1,3-10]. Однако следует заметить, что такой подход вступает в противоречия даже с нормативными документами по эксплуатации электроустановок. Так, согласно ПУЭ при эксплуатации сетей рассматриваемых классов напряжения допускаются смещения нейтрали: 15 % – длительно, 30 % – в течение одного часа и 100 % – в течение четырех часов.

Кроме этого, в процессе длительной эксплуатации на изоляцию электрооборудования постоянно оказывают влияние электрические, механические, тепловые и химические воздействия, приводящие к образованию в ней газовых включений. При появлении этих включений в непосредственной близости от потенциальных проводников, где напряженность электрического поля может превысить критическую, в них начинается ионизация и частичные разряды, которые с течением времени развиваются в стримерные искровые разряды с образованием напряженных проводящих древовидных побегов, прорастающих вглубь изоляции. Такие побеги, с одной стороны, увеличивают сквозную проводимость через изоляцию, т.е. снижают ее сопротивление, а с другой – шунтируют часть емкости объекта по отношению к земле и междуфазной емкости.

Исследования по оценке влияния несимметрии активной и реактивной проводимостей через изоляцию электрической сети на нормальный эксплуатационный режим работы электрооборудования производились с использованием математической и физической модели трехфазной кабельной сети с двигательной нагрузкой, в которой все элементы, с точки зрения их воздействия на характер переходных процессов в режиме однофазных замыканий фазы на землю, представлены в том виде, в каком они имеют место в реальной сети. Эта модель представляет собой по существу некоторое аналоговое специализированное вычислительное устройство, регистрация переходных процессов в котором позволяет получить в системе любую информацию в реальном масштабе времени. Принципиальная схема модели, представленная в [11], состоит из необходимого числа присоединений, соответствующих реальной системе электроснабжения и обобщенной нагрузки, ступенчатое подключение которой позволяет смоделировать практически

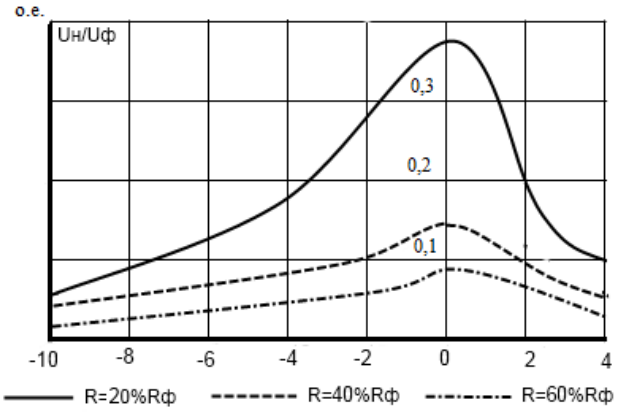
ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

любую промышленную сеть по току замыкания на землю. Каждое присоединение моделирует линию с подключенным к ней электродвигателем мощностью от 3 до 15 кВт. Модель кабеля замещается П-образной цепочечной схемой, каждая ячейка которой построена на отображении соответствующей величины погонных метров индуктивности кабеля $L_к$, емкости по отношению к земле $C_к$ и междуфазной емкостью $C_{мф}$, а также активного сопротивления жилы $R_{из}$. Длина кабеля сечением от 120 до 240 мм^2 моделируемого одной ячейкой, принята равной 100 м. Полная длина кабельной линии каждого присоединения принята равной 1000 м, а последовательные соединения таких кабельных линий одинакового сечения позволяют набрать длину присоединения до 2000 м, что соответствует предельным значениям длин кабельных линий сетей промышленного и коммунально-бытового назначения. Междуфазная емкость и регулируемое сопротивление утечками через изоляцию были подключены сосредоточенно в 3-4-х точках вдоль тысячеметровой длины кабельной линии. Регулированием величины сопротивления токам утечки через можно смоделировать сеть с любым состоянием изоляции ($tg\delta$ сети изменяется в пределах изоляцию от долей процента до 10 %).

Питание модели осуществляется от трехфазного трехобмоточного разделительного трансформатора напряжением 0,4/0,4 кВ, мощностью до 100 кВА со схемой соединения обмоток $Y/Y/\Delta$. Модель обеспечивает возможность проведения исследований по оптимизации режимов заземления нейтрали и оценки влияния режима нейтрали на характер переходных процессов и величину перенапряжений при однофазном замыкании фазы на землю (ОЗНЗ). С этой целью модель снабжена плавно регулируемой дугогасящей катушкой плунжерного типа и набором линейных и нелинейных активных сопротивлений и RC-цепочек. Такая катушка обеспечивает линейность регулируемых характеристик и необходимые параметры по току компенсации для всех исследованных в работе сетей.

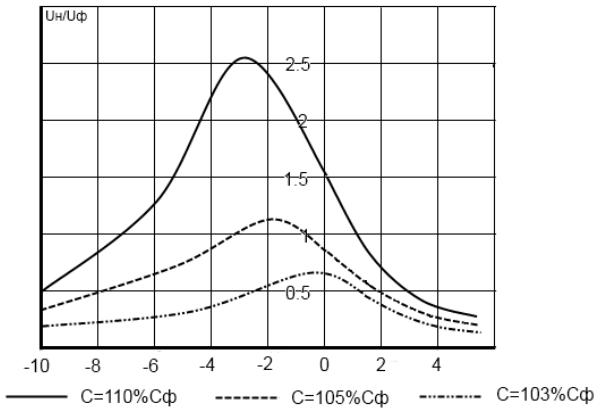
Результаты исследования влияния процессов старения изоляции на нормальный режим работы сети показали, что появление несимметрии емкостной и активной проводимостей через изоляцию приводит к смещению нейтрали и возникновению перекосов напряжения по фазам в нормальном эксплуатационном режиме работы сети. В сети с ДГК при наличии несимметрии настройка катушки в резонанс ведет к резкому увеличению напряжения смещения нейтрали. Показано, что несимметрия емкостей фаз относительно земли сильнее влияет на величину смещения нейтрали, чем несимметрия активных сопротивлений изоляции, что хорошо иллюстрируется для сети с емкостным током замыкания на землю 30 А, добротностью катушки в нейтрали R/X_L, равной 0,01, и сопротивлением изоляции 1 МОм (рис. 2, 3).

Так, например, при исследовании зависимости резонансных характеристик контура нулевой последовательности и напряжений смещения нейтрали от степени настройки дугогасящей катушки для разных по параметрам и состоянию



а

Рис. 2. Зависимость напряжения смещения нейтрали от степени расстройки катушки в несимметричной сети с ДГК ($I_{зам}$=30 А) при различной величине несимметрии, вызванной уменьшением сквозной активной проводимости через изоляцию в фазе А



б

Рис. 3. Зависимость напряжения смещения нейтрали от степени расстройки катушки в несимметричной сети с ДГК ($I_{зам}$=30 А) при различной величине несимметрии, вызванной уменьшением сквозной емкостной проводимости через изоляцию в фазе А

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

изоляции распределительных сетей оказывается, что изменение несимметрии активной составляющей сквозной проводимости через изоляцию даже на порядок приводит к изменению величины напряжения смещения в пределах долей однофазного напряжения. В то же время появление несимметрии, обусловленной изменением емкостной составляющей проводимости через изоляцию фаз всего лишь на три-пять процентов, приводит к увеличению напряжения смещения нейтрали до $U_{ф.ном.}$ и более в зависимости от степени настройки ДГК.

Важно обратить внимание также на тот факт, что по мере ухудшения состояния изоляции наряду с ростом тока в месте замыкания фазы на землю, обусловленного увеличением активных потерь в элементах сети, несимметрией и высшими гармониками, наблюдается процесс спрямления резонансной характеристики контура нулевой последовательности. При этом наиболее заметно этот процесс проявляется в сетях с более высокими параметрами по току замыкания.

Исходя из изложенного и в условиях широкого использования в практике эксплуатации дугогасящих катушек со ступенчатым регулированием индуктивности типа ЗРОМ и отсутствия в настоящее время качественных, серийно выпускаемых авторегуляторов для плавнорегулируемых ДГК типа РЗДПОМ; несовпадения интересов субъектов хозяйствования, когда в результате раздела в собственности одних оказались подстанции, где установлены ДГК, а у других – распределительные сети, где эти катушки необходимы, а также иных неизбежных и случайных факторов, влияющих на режимы настройки катушки, становится очевидным, что в сложившихся условиях качественная эксплуатация ДГК невозможна. При этом контроль степени настройки ДГК затруднен, а необходимая точность настройки маловероятна, что, с одной стороны, снижает эффективность от применения ДГК, а с другой – приводит к бесконтрольности уровня смещения нейтрали в таких сетях.

Последнее убедительно подтверждается опытом эксплуатации ряда энергетических предприятий Донбасского региона. Так, по данным измерений $3U_0$ на 53-х подстанциях предприятия «Кировские электрические сети» было установлено, что только на несколько большей части из них смещение нейтрали не превышало 20 %, а на остальной части подстанций оно составило в пределах 100 %, причем на отдельных подстанциях оно достигало более 100 %, что создает весьма тяжелые условия для работы изоляции электрических сетей. Большие напряжения смещения нейтрали в сетях имеют место также при обрывах и перегорании фаз отдельных присоединений, при наличии в сетях несимметричной нагрузки, в воздушных и воздушно-кабельных участках сети, в предпробойных состояниях изоляции фаз на землю и т.д. Поэтому большой практический интерес представляют результаты исследований по оценке влияния несимметрии напряжений на качественные и количественные параметры дуговых перенапряжений в сетях с изолированной нейтралью и компенсацией емкостных токов на землю.

Исследование переходных процессов при наличии несимметрии напряжений в указанных выше сетях при дуговых замыканиях на землю производилось на физической модели сети с использованием принципиально новой методики, позволяющей быстропротекающие процессы, какими являются дуговые перенапряжения, представлять в виде стоячих изображений на экране электронно-лучевых осциллографов. Это было достигнуто путем многократного наложения переходных процессов друг на друга с использованием специально разработанного устройства воспроизведения дуговых замыканий фазы на землю.

Воспроизведение всех возможных в реальных сетях замыканий фазы на землю осуществляется с помощью специально управляемого тиристорного ключа, выполненного на базе тиристора Т9-200, включенного в диагональ выпрямительного моста из вентилей ВК-200. Управление тиристором осуществляется с помощью блока формирования импульсов управления (ФИУ). Применение такого устройства позволяет быстропротекающие не периодически повторяющиеся процессы при дуговых замыканиях на землю представлять в виде стоячих изображений на экранах электронно-лучевых осциллографов, что существенно сокращает время на обработку исследуемой информации и дает возможность за весьма короткое время провести большой объем экспериментальных исследований по интересующему вопросу. Наиболее характерные осциллограммы могут быть зафиксированы на фотопленке с экрана осциллографа фотоаппаратом. Адекватность процессов в модели и реальной сети обеспечивается теорией подобия и моделирования электроэнергетических систем, изложенной в [12], и неоднократно подтверждалась экспериментальными исследованиями подобных процессов в реальных сетях.

Представленная ранее на рис. 1 характерная осциллограмма дуговых перенапряжений, полученная на физической модели электрической сети с током замыкания на землю 30 А, по каче-

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

ственным и количественным параметрам полностью соответствует современным представлениям о характере переходных процессов в симметричных электроустановках, работающих в режиме с изолированной нейтралью.

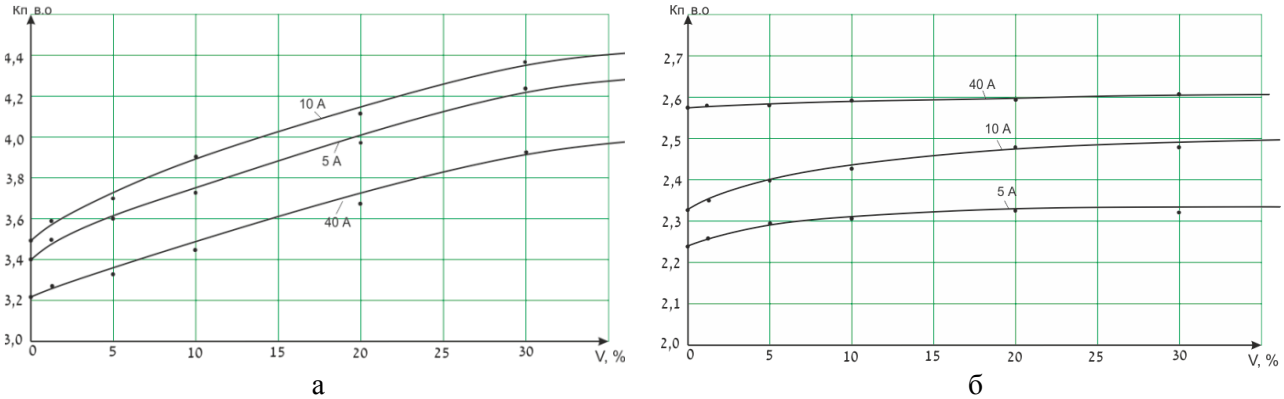
Проведенные исследования по оценке влияния несимметрии напряжений по фазам на качественные и количественные параметры дуговых перенапряжений в разных по параметрам и режиму заземления нейтрали сетях показывают, что независимо от характеристики сети кратность перенапряжений при дуговых замыканиях на землю растет примерно пропорционально несимметрии напряжения. Так, в сети с изолированной нейтралью (рис. 4) с ростом изношенности изоляции кратность дуговых перенапряжений независимо от параметров сети увеличивается примерно пропорционально несимметрии напряжения, и для реально возможной несимметрии в эксплуатации перенапряжения на 25-30 % могут превысить первоначальные значения. Это хорошо подтверждается результатами исследования перенапряжений в реальных сетях с результатами моделирования этих сетей в лабораторных условиях, когда, как уже отмечалось, исследуемая сеть принималась всегда симметричной.

С целью улучшения работы электрооборудования в сложившихся условиях специалисты рекомендуют перевести указанные сети из режима с изолированной нейтралью в режим заземления через активный резистор R≈130 Ом (резистивное заземление). Для оценки эффективности такого перевода в работе были проведены исследования, результаты которых представлены также на рис. 4б. Из анализа этого рисунка следует, что при правильном подборе величины сопротивления заземляющего резистора с учетом параметров сети можно ограничить перенапряжения до безопасной для электрооборудования величины. Однако такой режим заземления нейтрали приведет к резкому увеличению тока замыкания на землю, что потребует немедленного отключения резистора от сети релейной защиты с целью сохранения его термической устойчивости.

В сети с резонансно-компенсированной нейтралью прослеживается та же закономерность роста перенапряжений, что и в сети с изолированной нейтралью при увеличении несимметрии фазных напряжений (рис. 5, 6). Здесь кратность дуговых перенапряжений тоже зависит от параметров сети, а также от степени настройки дугогасящей катушки. Скорость нарастания кратности дуговых перенапряжений здесь несколько больше, чем в сети с изолированной нейтралью. При реально возможной несимметрии в сети с ДГК уровень перенапряжений может оказаться даже больше, чем без установки катушки. Подключение активного резистора параллельно ДГК также позволит ограничить величину дуговых перенапряжений до безопасной для электрооборудования величины (рис. 5б, 6б).

В электрических сетях с двигательной нагрузкой, например, в сетях собственных нужд электростанций и других промышленных объектов в последнее время неоднократно имели место случаи групповых отказов в работе электрооборудования, которые сопровождались разгрузкой энергоблоков или даже их полной остановкой. Наиболее часто при этом повреждались электродвигатели, имеющие, как известно, меньшие конструктивные запасы электрической прочности.

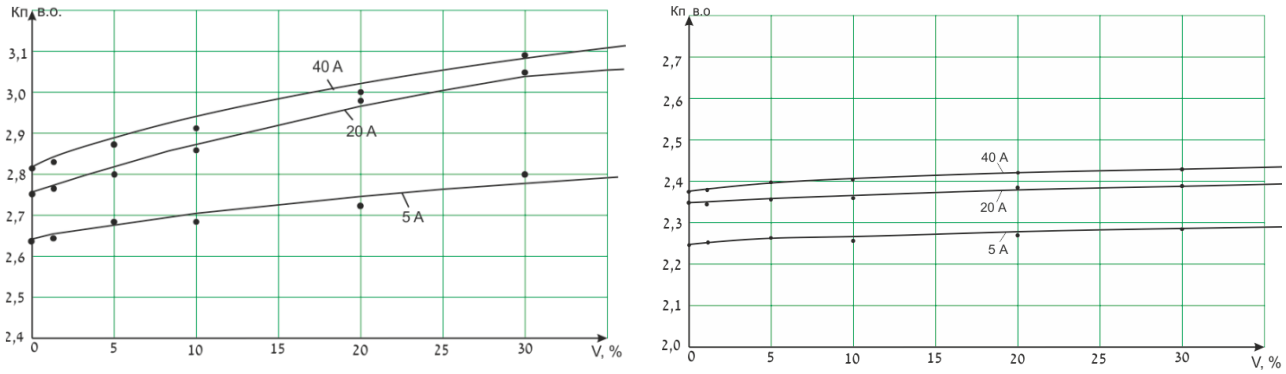
Послеаварийный анализ и обследования поврежденного электрооборудования показали, что во многих случаях причиной отказов является электрический пробой изоляции из-за перенапряжений, возникающих при дуговых замыканиях фазы на землю. В работе была поставлена задача выявления режимов, сопровождающихся опасными для изоляции перенапряжениями.



а б

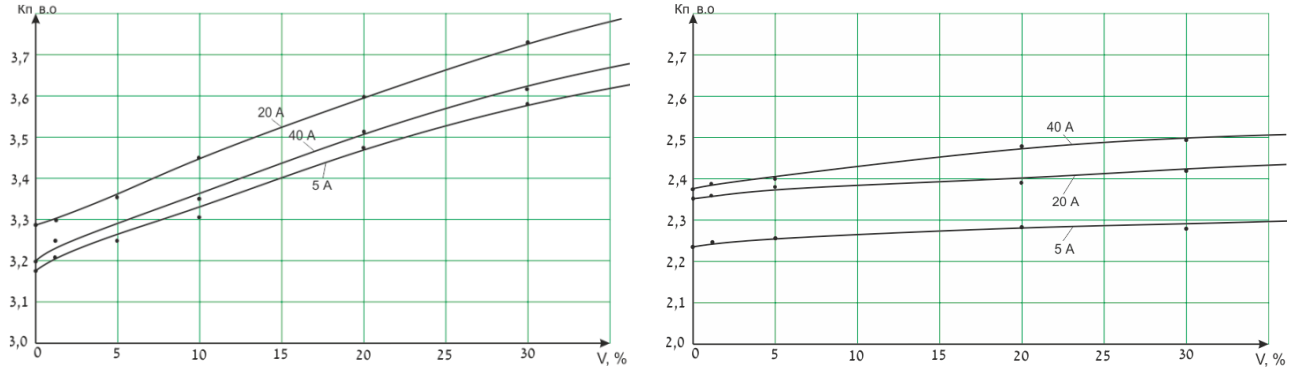
Рис. 4. Зависимость кратностей дуговых перенапряжений от степени смещения нейтрали в разных по параметрам сетях с *а* – изолированной; *б* – резистивно-заземленной нейтралью

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org



а б

Рис. 5. Зависимость кратностей дуговых перенапряжений от степени смещения нейтрали в разных по параметрам сетях с ДГК,
а – разветвления катушки 5 %; *б* – подключение параллельно ДГК резистора



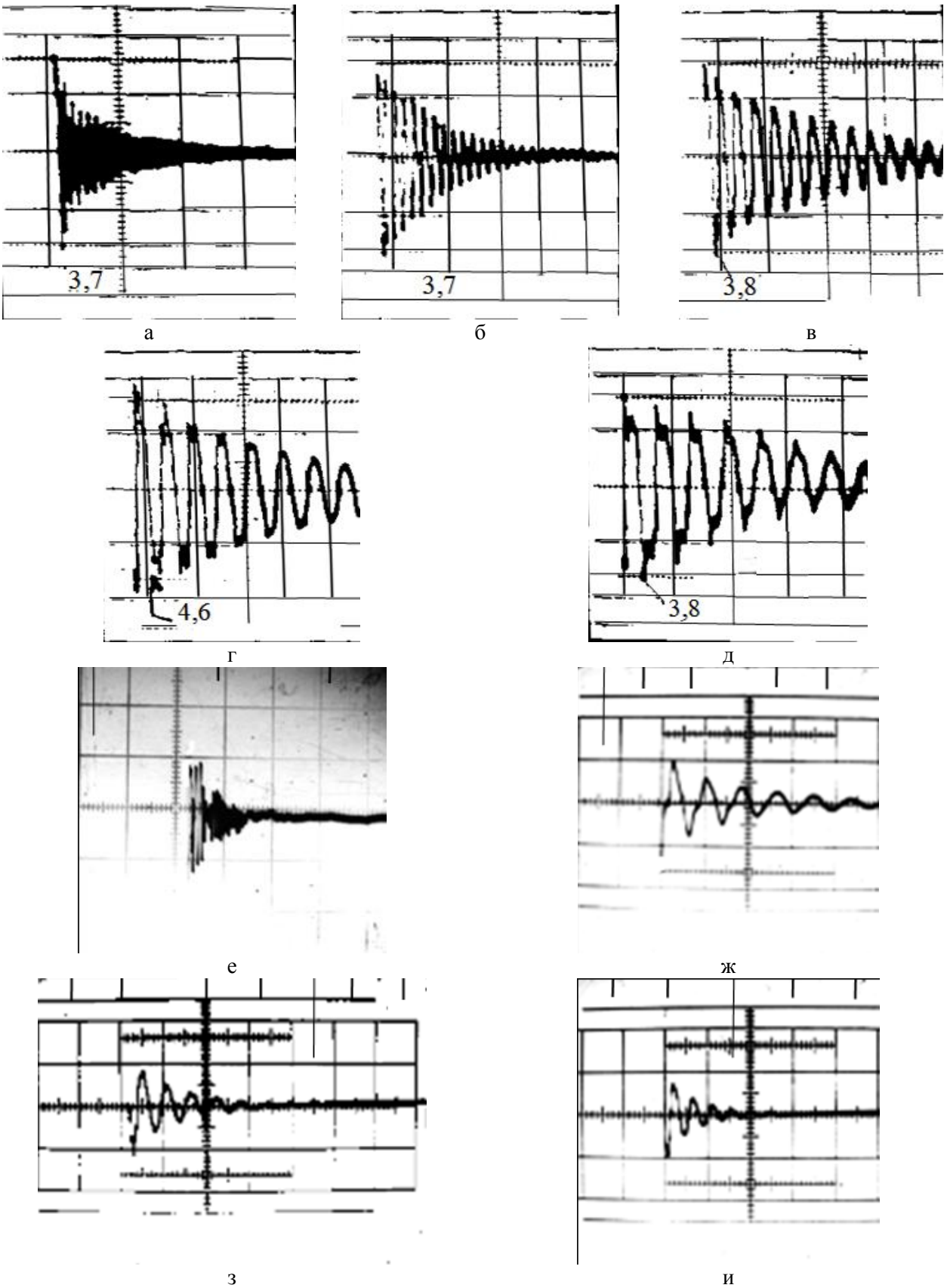
а б

Рис. 6. Зависимость кратностей дуговых перенапряжений от степени смещения нейтрали в разных по параметрам сетях с ДГК,
а – разветвления катушки 20 %; *б* – подключение параллельно ДГК резистора

Математический анализ, расчеты на ЭВМ и экспериментальные исследования на физической модели и в реальной сети показали, что одной из причин одновременного повреждения нескольких электродвигателей может быть выявленное авторами принципиально новое явление высокочастотного резонанса. Резонансные перенапряжения большой кратности возникают в петлях, образованных участком замкнувшейся на землю фазы питающего кабеля и подключенной к ней обмоткой электродвигателя (рис. 7). Кратности этих перенапряжений и вероятность их появления резко возрастают с увеличением протяжности питающей сети и мощности электроприемников, и для сетей, эквивалентных по емкости сетям собственных нужд энергоблоков мощностью 300-800 МВт, они могут значительно превысить нормы испытательного напряжения электрооборудования рассматриваемого класса. Наибольшие перенапряжения, достигающие шести- и более кратной величины, приходятся на начало статорных обмоток электродвигателей. В зависимости от параметров питающей сети и места замыкания фазы на землю условия для появления резонансных перенапряжений могут возникнуть одновременно в нескольких точках сети, что и является причиной одновременного (группового) повреждения нескольких электродвигателей. Частота, при которой наблюдается явление резонанса, зависит от параметров петли замкнувшейся на землю фазы кабель-электродвигатель и колеблется для рассмотренных параметров сетей в пределах от 10-12 кГц до сотен килогерц.

Большие перенапряжения возникают также в обмотке электродвигателя при замыкании ее на корпус. Исследования, выполненные на различных по мощности электродвигателях, показали, что при дуговом замыкании на расстоянии 5-10 % от начала обмотки в ней возникают быстрозатухающие перенапряжения с частотой порядка нескольких десятков килогерц. Кратность перенапряжений в значительной мере определятся параметрами питающей сети (суммарной емкостью по отношению к земле), и для сетей, эквивалентных по емкости сетям собственных нужд энергоблоков мощностью 300-800 МВт, получены напряжения пяти- и более кратного значения, т.е. значительно превышающие испытательное напряжение электродвигателей (1,73 $U_н$).

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org



а б в г д е ж з и

Рис. 7. Перенапряжения на зажимах электродвигателя 350 кВт поврежденной фазы сети с изолированной нейтралью на разном расстоянии от места замыкания:
а – 100 м от электродвигателя; *б* – 200 м; *в* – 300 м; *г* – 400 м; *д* – 500 м;
е, *ж*, *з*, *и* – эти же осциллограммы перенапряжений при подключении к нейтрали сети резистора.
При проведении опытов моделировалась сеть 6 кВ с током замыкания 7А;
масштаб: $U_ф$=0,5 клетки осциллографа

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Это позволяет объяснить наблюдаемые в эксплуатации случаи, когда повреждение электродвигателя начинается с замыкания на корпус статорной обмотки с последующим пробоем межфазной изоляции в другой точке обмотки и переходом однофазного замыкания в двухфазное короткое замыкание, что увеличивает объем разрушений и приводит к повышению затрат, связанных с восстановлением поврежденных электродвигателей. Максимальное значение перенапряжений приходится на середину обмотки. При удалении точки замыкания от начала обмотки кратность перенапряжений резко снижается, и при замыкании на расстоянии 20-25 % от ее начала значение их не превышает испытательного напряжения.

Поскольку эти перенапряжения носят локальный характер, концентрируясь в основном в местах подключения больших индуктивных сопротивлений, а место их возникновения определяется параметрами сети и точкой замыкания фазы на землю, распространенные в настоящее время средства ограничения и регистрации перенапряжений в данном случае оказываются неэффективными.

На основе анализа результатов исследования установлено, что при подключении к нейтральной точке сети или нейтрали электродвигателя величиной даже до нескольких килоом величина перенапряжений снижается до безопасной для электрооборудования, в том числе электродвигателей, величины, что иллюстрируется осциллограммой рис. 7е-и.

Выводы

1. Опыт эксплуатации последних лет указывает на существенное увеличение нарушений нормальной работы распределительных сетей среднего класса напряжения. Установлено, что основной причиной повреждения электрооборудования здесь является электрический пробой изоляции при воздействии перенапряжений в режиме дуговых замыканий фазы на землю.

2. Исследованиями установлено, что ухудшение технического состояния электрических сетей сопровождается увеличением несимметрии напряжений по фазам, что, в свою очередь, приводит к резкому увеличению кратности дуговых перенапряжений.

3. При моделировании распределительных сетей напряжением 6-10 кВ с двигательной нагрузкой обнаружено принципиально новое явление высокочастотного резонанса, которое позволяет объяснить нередко наблюдаемые в эксплуатации случаи многоместных пробоев изоляции на поврежденной фазе с групповым выходом из строя электрооборудования.

4. В работе предложено схемное решение, практическая реализация которого позволит симметрировать фазные напряжения распределительной сети; снизить кратность дуговых перенапряжений до безопасной для электрооборудования величины и таким образом продлить срок службы давно исчерпавшего свой ресурс электрооборудования.

Список литературы

1. Сивокобыленко, В.Ф. Ограничение перенапряжений в системе собственных нужд электростанций / В.Ф. Сивокобыленко, М.П. Дергилёв, С.А. Иванов и др. // Энергетика и электрификация. – № 4. – 1996. – С. 20-22.
2. Дергилёв, М.П. Дуговые перенапряжения в электрических сетях в условиях постоянного ухудшения состояния изоляции / М.П. Дергилёв, А.А. Михайлов // Вестник кафедры «Электротехника» по итогам научной деятельности студентов. – Донецк: ДонНТУ, 2014. – С. 49-51.
3. Сарин, Л.И. Анализ результатов мониторинга процессов при однофазных замыканиях на землю в сети 6 кВ с дугогасящими реакторами и резисторами в нейтрали / Л.И. Сарин, М.В. Ильиных, А.И. Ширковец и др. // Энергоэксперт. – № 1. – 2008. – С. 56-64.
4. Бохан, А.Н. Особенности моделирования перенапряжений в сетях с ОПН / А.Н. Бохан, В.В. Кротенок, С.Н. Прохоренко // Материалы междунар. науч.-практ. конф. «Наука и производство», 19-20 марта 2009 г., г. Брянск. – Брянск: БГТУ, 2009. – С. 1-5.
5. Yongduan Xue. Research on adaptive tripping for single phase earth fault in neutral point no effectively grounded system / Yongduan Xue, Qiufeng Zhang, Zhenheng Wang et al. // Proceedings of China International Conference on Electricity Distribution (CICED 2012), 5-6 September, Shanghai, 2012. – P. 1-5.
6. Ma Shicong. An earth fault locating method in feeder automation system by examining correlation of transient zero mode currents / Ma Shicong, Xu Bingyin, Gao Houlei, et al. // Automation of Electric Power Systems. – 2008. – No.32 (7). – P. 48-52.
7. Чазов, Ю.О. Анализ величины перенапряжений при однофазном замыкании на землю в сети 35 кВ, работающей в режиме изолированной нейтрали / Ю.О. Чазов, И.А. Перминов, Н.П. Кочетков // Научный журнал КубГАУ. – № 87(03). – 2013. – С. 1-10.
8. Вильгейм, Р. Заземление нейтрали в высоко-

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

вольтных системах / Р. Вильгейм, М. Уотерс. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1959. – 416 с.
9. Лихачев, Ф.А. Замыкание на землю в сетях с изолированной нейтралью и компенсацией ёмкостных токов. – М.: Энергия, 1971. – 152 с.
10. Беляков, Н.Н. Исследования перенапряжений при дуговых замыканиях на землю в сетях 6-10 кВ с изолированной нейтралью / Н.Н. Беляков. – Электричество. – № 5. – 1957. – С. 31-36.
11. Дергилёв, М.П. Физическая модель для исследования и оптимизации режима нейтрали трёхфазных электрических сетей с двигательной нагрузкой / М.П. Дергилёв, М. Саиди // Сборник научных трудов ДонГТУ, выпуск 2. – Донецк: ДонГТУ, 1998. – С. 206-210.
12. Веников, В.А. Теория подобия и моделирования. – М.: Высшая школа, 1976. – 480 с.

M.P. Dergilev /Cand. Sci. (Eng.)/, S.N. Tkachenko /Cand. Sci. (Eng.)/
Donetsk National Technical University (Donetsk)

IMPROVEMENT OF WORKING CONDITIONS OF ELECTRICAL EQUIPMENT IN NETWORKS WITH INSULATED AND RESONANT-COMPENSATED NEUTRAL IN THE CONTEXT OF SEVERE INSULATION DETERIORATION

Background. *In the recent conditions of severe deterioration of insulation of electric networks of medium voltage, there has been an increase in damage to electrical equipment. Mostly being damaged are electric motors and cables. Based on the analysis of the operating experience found that the main reason for such damage is the flux of the internal overvoltage and, above all, overvoltage associated with single-phase earthing (arc overvoltage). Shown that the deterioration of the technical condition of networks is accompanied by an increase in the asymmetry of active end-to-end conductivity and capacitive conductivity through insulation phases.*

Materials and methods. *The objective of the paper is to assess the impact of insulation wear both on the normal operating modes of electric equipment and on qualitative and quantitative parameters of transient processes at arc phase earthing in these networks. Studies conducted using mathematical and physical models of the cable network according to a fundamentally new method of recording fast transient processes. Of great interest are also the transient processes in the discharge circuits formed by the earthed phase of the supply cable and the electric motor winding.*

Results. *The results of the studies show that in the networks with insulated neutral, in case of phase asymmetry, arc overvoltages increase approximately in proportion to this asymmetry. Depending on the parameters of the network and the state of its insulation at a possible in operation asymmetry of phase voltages the multiplicity of overvoltage in the networks with insulated neutral can be 20-30 % more as compared to a symmetrical network with the same parameters. In the networks with compensation of capacitive currents to the ground, these overvoltages reach the same value as in networks without arc suppression coils (ASC). In the above-mentioned discharge circuit, found a fundamentally new phenomenon of high-frequency resonance with a large multiplicity of overvoltages significantly exceeding the norms of test voltage of electrical equipment.*

Conclusion. *Established that with the deterioration of insulation of electric networks 6-35 kV multiplicity of the most dangerous arc overvoltages increases, which is the cause of high damage to electrical equipment. The phenomenon of high-frequency resonance detected allows explaining the cases of repeatedly observed in operation multiple insulation breakdowns on the damaged phase with the group electrical equipment failure.*

Keywords: *electric network, neutral displacement, overvoltage multiplicity, limitation.*

Сведения об авторах

М.П. Дергилёв
SPIN-код: 5097-8133
Телефон: +380 (62) 335-34-55
Эл. почта: mozdik@mail.ru

С.Н. Ткаченко
SPIN-код: 5046-6030
Телефон: +380 (62) 301-03-72
Эл. почта: tsn1981@mail.ru

Статья поступила 15.03.2018 г.
© М.П. Дергилёв, С.Н. Ткаченко, 2018
Рецензент д.т.н., проф. Э.Г. Куренный

УДК 622.33.012

И.В. Ковалева /к.т.н./, О.К. Маренич
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ТОКООГРАНИЧЕНИЯ ЦЕПИ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В КОНТЕКСТЕ ПРИМЕНЕНИЯ ВАКУУМНЫХ КОММУТАТОРОВ

На основании сопоставления различных схем токоограничения установлена приемлемость применения вакуумных контакторов коммутаторов в цепи соединения вторичных фазных обмоток трансформатора участковой подстанции в звезду. Использованы технические преимущества контактора SPVC, содержащего в своем составе катушку Роговского в качестве датчика тока. Предложена схема быстрого выявления процесса короткого замыкания и принудительного отключения вакуумных контакторов как средства обесточивания аварийного электрического присоединения в процессе отключения короткого замыкания. Сопоставление результатов моделирования процессов токоограничения, реализуемых различными схемами, показало эффективность и приемлемость применения контакторного коммутатора трехфазной обмотки питающего трансформатора в качестве исполнительного узла устройства токоограничения.

Ключевые слова: *электротехнический комплекс, короткое замыкание, защитное отключение, автоматический выключатель, токоограничение, электрическая схема, дроссель, вакуумный контактор, датчик тока, датчик короткого замыкания, ускоренное обесточивание, компьютерная модель, электрические параметры.*

Постановка проблемы

Процесс короткого замыкания (КЗ) шахтной участковой электрической сети сопровождается крайне высокими токами, что приводит к значительным тепловым перегрузкам силовых контактных соединений автоматического выключателя в момент отключения аварийного процесса. Практика эксплуатации показала, что дугообразование в межконтактных промежутках при отключении токов короткого замыкания в сети линейного напряжения 1140 В сопровождается мощными ионизационными процессами, металлизацией изоляционных корпусов дугогасительных камер и, как следствие, провоцирует междуфазные короткие замыкания в самом автоматическом выключателе [1]. Поэтому задача ограничения тока сети в момент отключения КЗ является актуальной и требует исследований в области поиска и обоснования технических средств, обеспечивающих максимальное быстродействие данного процесса.

Анализ последних исследований и публикаций

Современные электрические сети шахтных участковых электротехнических комплексов отличаются разветвленностью кабельных линий. При этом применяются исключительно гибкие экранированные кабели, поскольку электромеханическое оборудование данных комплексов является нестационарным. В результате, повреждения механически не защищенных гибких кабелей являются наиболее вероятными причинами аварийных и опасных состояний, в частности коротких замыканий. С учетом тенденции к повышению мощности электрооборудования речь идет о крайне высоких токах междуфазных замыканий, что предопределяет необходимость использования средств токоограничения применительно к аппаратуре защитного отключения [2]. Одним из решений в области быстродействующего ограничения тока короткого замыкания является применение коммутируемых индуктивностей в цепи защищаемого присоединения [3]. Схемно такое техническое решение представляется совокупностью встречно-параллельно включенных индуктивностей, одна из которых отключается симисторным коммутатором в момент исчезновения линейного напряжения в защищаемой сети. Исследования данной схемы [4] показали ее работоспособность, при этом в зависимости от установленной мощности потребителя (от 200 кВт до 800 кВт) падение напряжения на реакторе достигалось соответственно от 3,5 % до 13,7 %. Анализ быстродействия данной схемы требует отдельного исследования, учитывающего инерционность индуктивных элементов. Однако данное устройство отли-

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

чается существенными габаритами, наличием трех силовых симисторов (требуется эффективная система их охлаждения). При этом габариты схемы (параметры дросселей) находятся в соотношении с мощностью нагрузки, что ограничивает применение дросселей для токоограничения в сетях с потребителями высокой мощности.

Безинерционностью и, следовательно, высокой скоростью срабатывания характеризуется токоограничитель, построенный по принципу разрыва цепи соединения «звезда» вторичных фазных обмоток трасформатора и реализованный предохранителем в качестве нагрузки выпрямительного моста [5]. Такая схема по своим габаритам не зависит от мощности нагрузки и может быть применена непосредственно в составе участковой трансформаторной подстанции. Однако остается проблемной задача охлаждения силового полупроводникового мостового выпрямителя в условиях его размещения в рудничном взрывобезопасном корпусе. Кроме этого, срабатывание плавкого предохроанителя в момент возникновения короткого замыкания в мощной электросети линейного напряжения 1140 В будет сопровождаться значительным тепловыделением (перегорание плавкой вставки) и может спровоцировать взрыв метановоздушной смеси внутри оболочки трансформаторной подстанции, сопровождаемый возникновением значительного давления в ней. Так, известно, что при сгорании метано-воздушной смеси в замкнутом объеме без тепловых потерь давление внутри оболочки находится в пропорциональной зависимости от температуры в месте воспламенения элементов электрооборудования [6]. Поэтому применение плавкого предохранителя в качестве исполнительного элемента схемы токоограничения при отключении короткого замыкания создает потенциальную опасность взрыва метано-воздушной смеси внутри оболочки участковой трансформаторной подстанции и, как следствие, разрушения конструкции электрических элементов, размещенных в ней.

Цель (задачи) исследования

Рассмотренные проблемные вопросы предполагают поиск альтернативных технических решений при реализации общей идеи ускоренного разрыва схемы «звезда» вторичной трехфазной обмотки трансформатора подстанции в момент возникновения короткого замыкания. В частности, к необходимым и достаточным условиям реализации защитной функции следует отнести:

– соответствие коммутационной способности исполнительного устройства разрыва схемы «звезда» реальным параметрам коммутируемого тока короткого замыкания;

– непревышение продолжительностью срабатывания исполнительного устройства величины времени разрыва силовой цепи контактами автоматического выключателя участковой трансформаторной подстанции;

– недопущение открытого дуго-, искрообразования в силовой цепи исполнительного устройства в процессе разрыва схемы «звезда» трансформатора при реагировании на процесс короткого замыкания в его силовом присоединении.

Очевидно, что перечисленные уловия в своей совокупности представляют собой техническое противоречие, решение которого требует разработки схемы принудительного ускоренного отключения силового устройства бездуговой коммутации, что и является целью настоящей работы.

Основной материал исследования

Обзор известных схем токоограничения защитного отключения короткого замыкания (рис. 1, 2) выявил их недостаточную функциональность. Однако схема, реализующая разрыв звезды вторичных обмоток трансформатора участковой подстанции (рис. 2), создает приемлемые электроэнергетические условия последующего отключения аварийного присоединения контактами автоматического выключателя. Приемлемо рассмотренную функцию следует взять за основу, исключив при этом из схемы полупроводниковый силовой выпрямитель и плавкий предохранитель в качестве его нагрузки. В этом случае звезда вторичных обмоток трансформатора может быть разорвана отключением двух контакторов, расположенных между началами трехфазных вторичных обмоток трансформатора подстанции. Обзор технических средств в области силовой коммутации мощных присоединений [7,8] позволил сделать вывод о принципиальной возможности использования однополюсных вакуумных контакторов типа SPVC отечественного производства в сетях линейного напряжения 660 В и 1140 В [9].

Техническая характеристика данного контактора определяет величину максимального коммутируемого тока в 30 кА и время размыкания контактов 7±2 мс. Указанные параметры согласуются с величинами аварийных токов шахтных участковых электросетей высокой мощности и сопоставимы с параметрами быстродействия современных микропроцессорных устройств максимальной токовой защиты [10,11]. Преимуществом данного технического решения

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

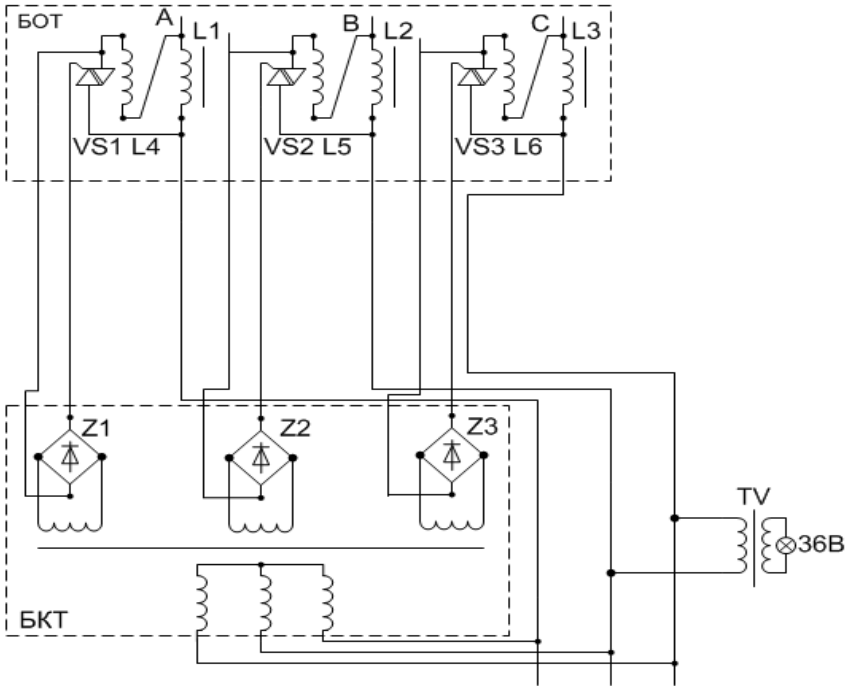


Рис. 1. Схема дроссельного ограничения тока короткого замыкания

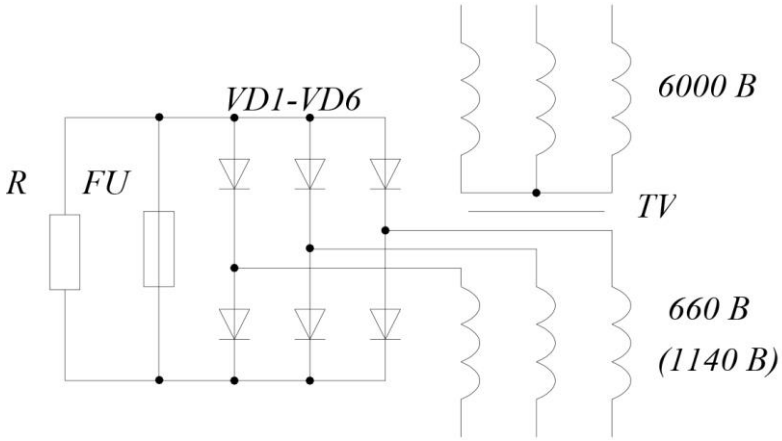


Рис. 2. Трехфазный трансформатор напряжения с устройством токоограничения при защитном отключении

является то, что процесс разрыва аварийной силовой цепи будет происходить в вакуумной камере и не провоцировать взрыв метановоздушной смеси внутри рудничной оболочки трансформатора.

Заявленный параметр быстродействия схемы определяется тем, что отключение (обесточивание) катушки контактора происходит не вследствие ее контактной коммутации, а в результате встречного разряда предварительно заряженного конденсатора С2 (рис. 3б). Коммутация самого конденсатора может быть выполнена быстродействующей полупроводниковой схемой устройства максимальной токовой защиты, связанного непосредственно с датчиком тока L (рис. 3а), встроенным непосредственно в корпус контактора.

Это тем более уместно, поскольку конструкция самого контактора SPVC 1-630 позволяет реализовать функцию ускоренного выявления процесса короткого замыкания в защищаемой сети. Данный эффект достигается за счет применения в составе указанного контактора катушки Роговского в качестве датчика тока. Известно, что катушка Роговского, будучи надетой на шину токопровода, формирует на выходе напряжение, величина которого пропорциональна скорости нарастания тока в указанной шине:

$$u(t) = \left(\frac{L}{N}\right)\frac{di(t)}{d(t)},$$

где L – индуктивность катушки; N – количество витков катушки.

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

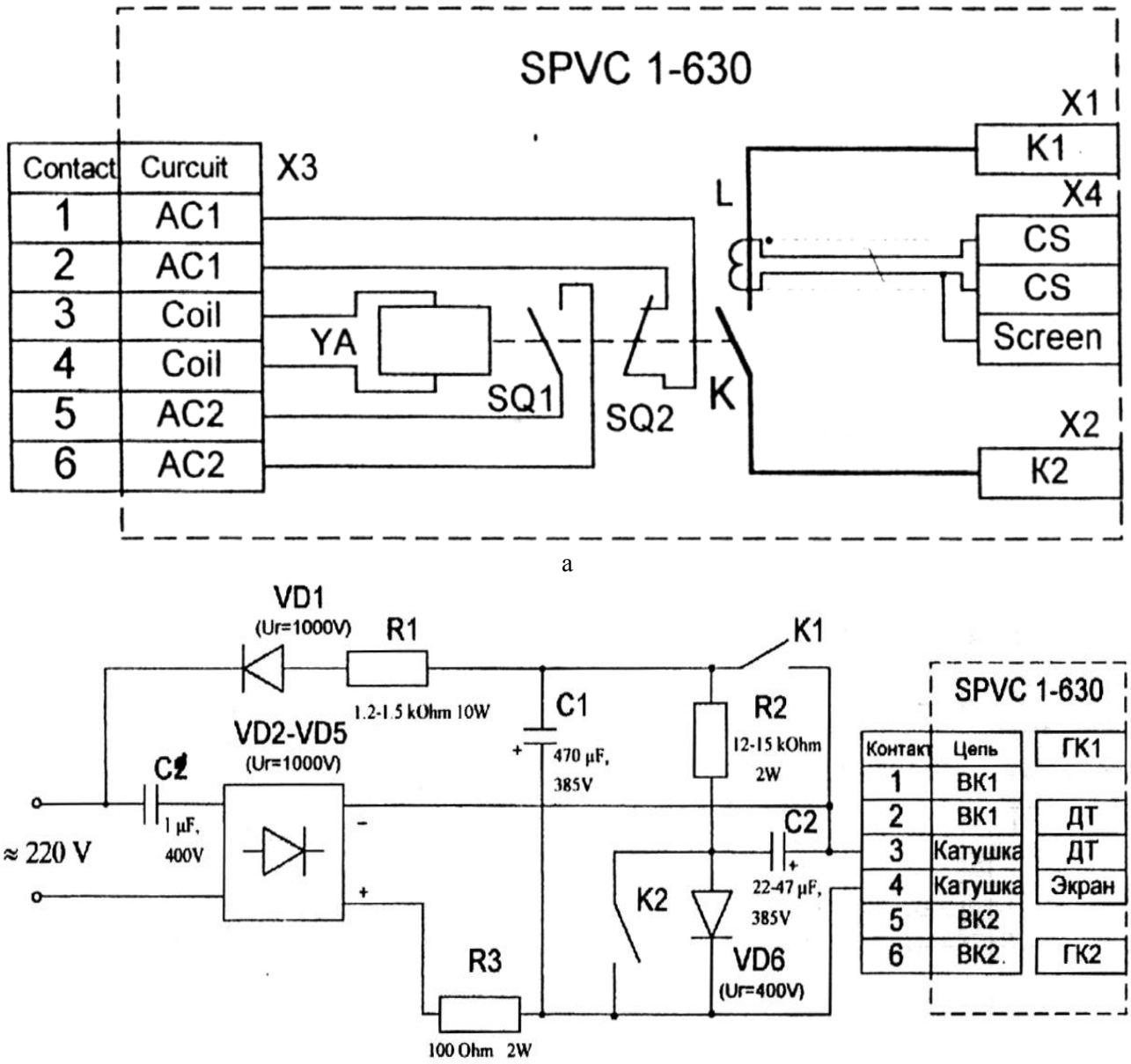


Рис. 3. Схема контактора SPVC 1-630 (*а*) и вариант им управления (*б*)

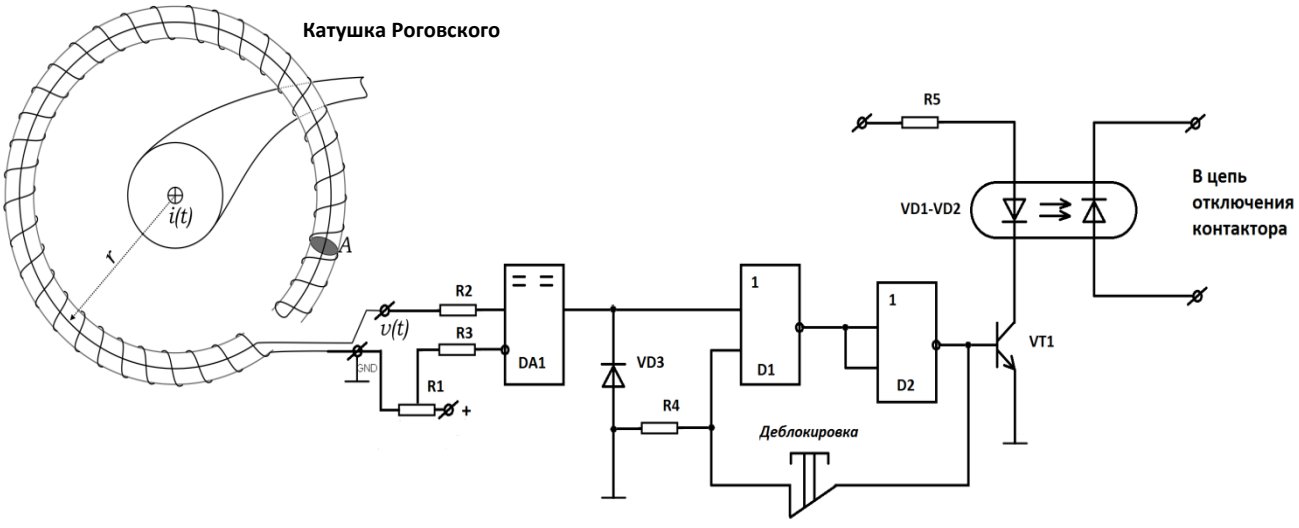


Рис. 4. Схема датчика короткого замыкания

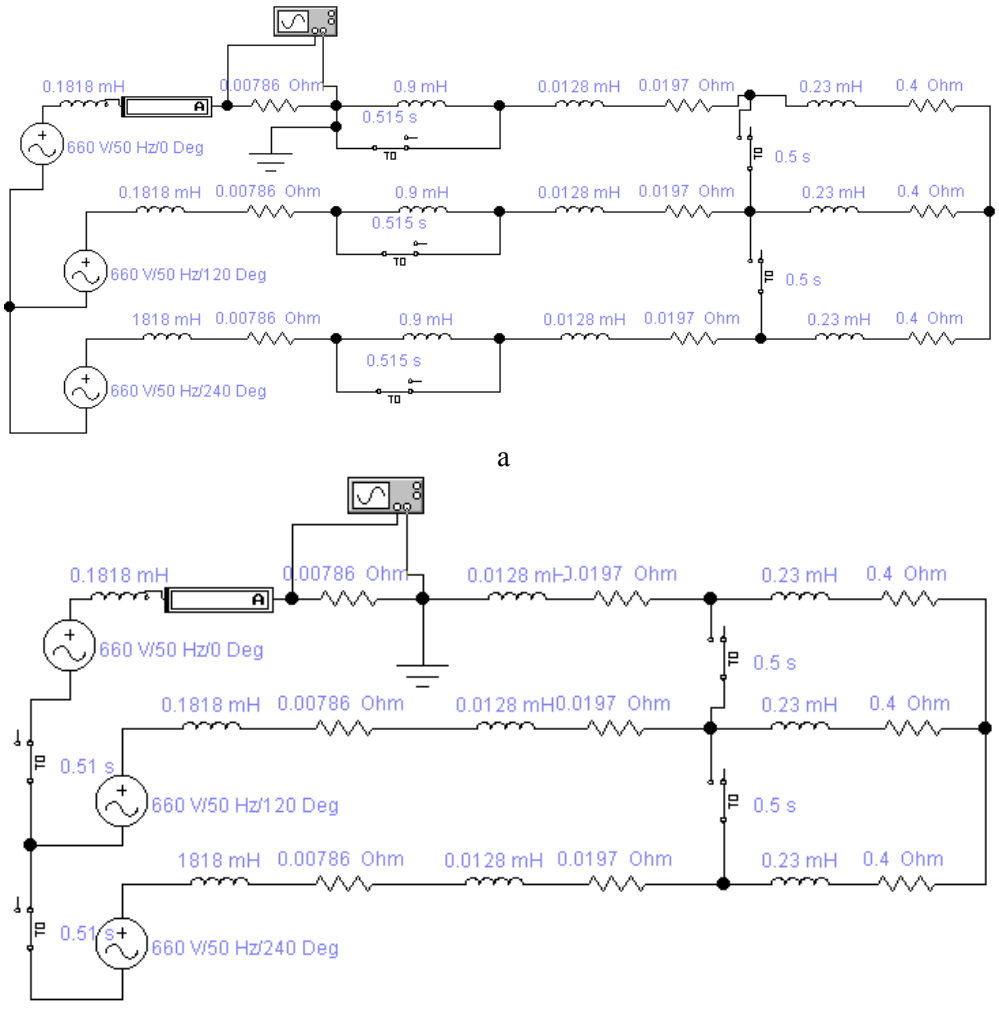
ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Это позволяет построить схему устройства выявления короткого замыкания на базе компаратора DA1 (рис. 4), сопоставляющего величину импульса напряжения на выходе катушки Роговского с установкой, формируемой потенциометром R1. Кратковременный импульс, снимаемый с выхода компаратора DA1, запоминается как сигнал о коротком замыкании триггерной схемой на элементах «ИЛИ» D1 и D2, что в дальнейшем отрабатывается отпиранием ключевого транзистора VT1 и срабатыванием оптрона VD1-VD2.

Учитывая конфигурацию схемы управления контактором (рис. 4), фотодиод оптрона VD2 следует подключить параллельно кнопке «Стоп» К2 в цепь разряда коммутационного конденсатора. Таким образом обеспечивается мгновенная реакция схемы на процесс короткого замыкания.

Представляется рациональным сопоставить технические возможности данной схемы токоограничения и схемы индуктивного ограничителя тока [3]. Компьютерные модели данных схем представлены на рис. 5. При моделировании введены допущения, что активное и индуктивное сопротивления источника питания соответствуют параметрам трансформатора подстанции ТСВП-1000-6/1.2; отходящий кабель марки ЭВБВ 3х95 длиной 200 м; точка короткого замыкания находится в 10 м от трансформаторной подстанции; сопротивление нагрузки соответствует активным и индуктивным параметрам двигателя мощностью 250 кВт. При этом учитывается время срабатывания защиты типа БКС-3МК – 5 мс, задержка на отключение встречной индуктивности в цепи токоограничения – 10 мс. Кроме этого, вводится допущение, что в течение 20 мс с момента возникновения короткого замыкания силовая цепь аварийного присоединения остается не разомкнутой силовыми контактами автоматического выключателя трансформаторной подстанции.

Сопоставление диаграмм фазных токов (рис. 6) подтверждает наличие инерционности схемы дроссельного токоограничения, наличие тока высокой величины в сети аварийного присоединения после его срабатывания. При этом выявленные недостатки отсутствуют в схеме токоограничения на основе контакторной коммутации

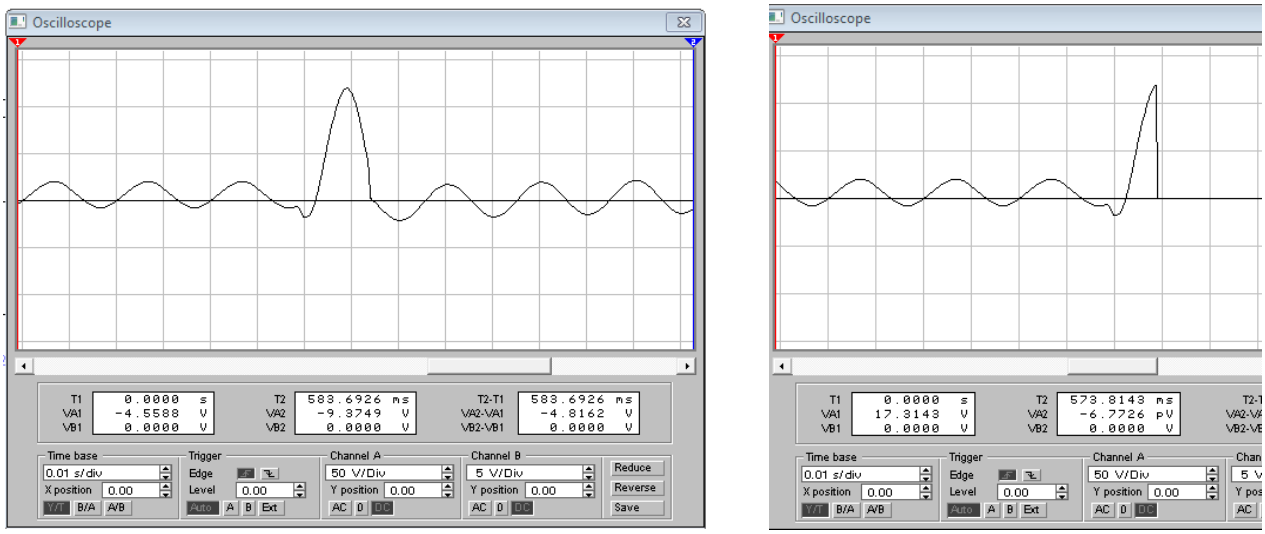


а

б

Рис. 5. Компьютерные модели схем с токоограничителями: *а* – по рис. 1; *б* – по рис. 2

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org



а б

Рис. 6. Диаграммы моделирования формы токов вторичной фазной обмотки трансформатора подстанции ТСВП-1000-6/1,2, снятые с шунта фазной шины при способах токоограничения: *а* – дроссельном; *б* – контакторном. Допущения – сечение жилы отходящего кабеля – 95 мм^2, точка КЗ в 10 м от выхода подстанции

звезды трехфазной обмотки трансформатора подстанции. Так, продолжительность существования аварийного режима будет сопоставима с соответствующим временным параметром при применении дроссельного токоограничителя. Однако после срабатывания контакторного узла разъединения трехфазной схемы вторичной обмотки трансформатора питания электрической сети в ней полностью прекращается электрический ток, что существенно снижает тепловую нагрузку в силовых контактных соединениях автоматического выключателя трансформаторной подстанции.

Выводы

Установлена принципиальная возможность применения вакуумных контакторов, в частности, серии SPVC для реализации функции ограничения тока короткого замыкания в процессе отключения аварийного режима в шахтной участковой электрической сети высокой мощности линейного напряжения 1140 В. Установлены преимущества данного технического решения в сравнении с известными прототипами и возможность ограничения тока на уровне, недостаточном для повления тепловой перегрузки силовых контактов автоматического выключателя трансформаторной подстанции. Направлением дальнейших исследований следует считать экспериментальную проверку технических характеристик предложенной схемы.

Список литературы

1. Смирнова, Н.В. Упраление процессом горения электрической дуги на нелинейных участках её вольт-амперной характеристики с использованием массива прецедентов / Н.В. Смирнова, В.В. Смирнов // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. Зб. наук. праць. КірДТУ. – Вип. 43, ч. II. – Кіровоград: КірДТУ, 2013. – С. 271-274.
2. Маренич, К.М. Властивості силового електроустаткування технологічної дільниці в контексті створення експлуатаційних небезпек / К.М. Маренич // Холодильна техніка і технологія. – № 1 (141). – 2013. – С. 80-84.
3. Авт. свид. 913516 СССР, МПК H02H09/02. Токоограничивающее устройство / В.А. Машкин, Л.С. Беспалов, В.Г. Савельев (СССР). – № 3000759/24-07; заявл. 25.07.1980; опубл. 15.03.1982. Бюл. № 10.
4. Жуйков, П.К. Об ограничении токов короткого замыкания в цепях электроснабжения / П.К. Жуйков // Материалы международной конференции «Форум гірників», 11-13 октября 2007, Днепропетровск. – Днепропетровск: НГУ, 2007. – С. 203-206.
5. Патент на изобретение 102285 (UA), МПК (2013.01) H02H 3/00. Трифазний трансформатор напруги / К.М. Маренич, І.В. Ковальова, О.К. Маренич. – а 2011 09048; заявл. 19.07.2011; опубл 25.06.2013. Бюл. № 12.
6. Переходные процессы в системах электроснабжения: учебник [для студентов высших учебных заведений] / Г.Г. Пивняк [и др.]; под ред. академика НАН Украины Пивняка Г.Г. – [3-е изд.]. – М.: Энергоатомиздат; Днепропетровск: НГУ, 2003. – 548 с.
7. Berryann, R.J. Evolution of Longwall Mining and Control Systems in the United States [Electronic resource] / R.J. Berryann, J.A. Voelker // Mine

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Safety and Health Administration, Division of Electric Safety. – Triadelphia, West Virginia, 2005. – Mode of access: https://pdfs.semanticscholar.org/6827/53887a0b319296f716beb11b9f01273115a1.pdf?_ga=2.1670840.803898779.1508794395-959523617.1508794395
8. Saccomanno, F. Electric Power Systems: Analysis and Control / F. Saccomanno. – Wiley-IEEE Press, 2003. – 744 p.
9. Контактор однофазный вакуумный серии SPVC. Техническое описание: Контактор серии SPVC, завод «Таврида», Севастополь [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.masters.donntu.org/2008/fema/tarasenko/library/5.htm
10. Groh, H. Explosion protection: electrical apparatus and systems for chemical plants, oil and gas industry, coal mining / Heinrich Groh. – Amsterdam; London: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004. – 524 p.
11. Техническая характеристика блока токовой защиты БКЗ-3МК [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://itep.com.ua/ru/catalogue/defence/bkz-3_mk.

I.V. Kovaleva /Cand.Sci. (Eng.)/, O.K. Marenich
Donetsk National Technical University (Donetsk)

TECHNICAL IMPLEMENTATION OF CURRENT LIMITING IN SHORT CIRCUITS IN THE CONTEXT OF VACUUM SWITCHES APPLICATION

Background. *Determined the relevance of application of current limiters providing the efficiency of auto switch series AB 37XX for the mine transformer substation in the line voltage 1140 V network with consumers of high rated power. On the basis of comparison of various schemes of current limiting of the short circuit of mine electric network, the factors limiting the use of choke schemes and safety fuses as a switching of «star» scheme of the secondary winding of the transformer of mine substation revealed. Based on the analysis of the technical characteristics of the switching devices of power circuits, the acceptability of the use of vacuum contactors in the circuit of star connection of the secondary phase windings of substation transformers established.*
Materials and/or methods. *The technical advantages of SPVC contactor used, and the principal possibilities of the accelerated shutoff through the creation of the countercurrent due to the discharge of the switching capacitor considered. Taken into account the benefits associated with the presence in the structure of SPVC contactor of a current sensor – Rogowski coil, the voltage pulse generator with an amplitude proportional to the derivative of current over time.*
Results. *The scheme of the device for fast detection of short-circuit process on the basis of analog comparator, trigger cell and an optoelectronic actuator for switching the capacitor of the contactor forced shutoff proposed. Acceptable time characteristics established of a short circuit de-energization for the time not exceeding the disconnection period of the power contact group of the main circuit breaker of mine transformer substation in the process of protective shutoff of the short circuit in the power connection. Modeling of the short circuit current limiting processes implemented in relation to the parameters of a real electrotechnical complex with the use of a transformer substation of 1000 kVA capacity and an outgoing connection cable with a cross-section of the working core of 95 sq. mm, taking into account the distance to the short-circuit point in the range of 10 m to 200 m.*
Conclusion. *Comparison of the results of simulation of current limiting processes realized by different circuits confirmed the limited functionality of the choke current limiter and showed the efficiency and acceptability of using the contactor switch of the three-phase winding of the supply transformer as the working unit of the current limiter.*

Keywords: *electrotechnical complex, short circuit, protective shutoff, circuit breaker, current limiting, electrical circuit, choke coil, vacuum contactor, current sensor, short circuit sensor, accelerated shutoff, computer model, electrical parameters.*

Сведения об авторах

И.В. Ковалева
Телефон: +380 (71) 334-91-00
Эл. почта: visara@mail.ru

О.К. Маренич
Телефон: +380 (71) 317-32-09
Эл. почта: marenich13@gmail.com

Статья поступила 26.02.2018 г.
© И.В. Ковалева, О.К. Маренич, 2018
Рецензент д.т.н., проф. Э.Г. Куренный

УДК 613.313

С.Н. Ткаченко /к.т.н./, А.В. Коваленко, А.В. Панфилов
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

РОЛЬ И МЕСТО ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМАХ КОНЦЕПЦИИ SMART GRID

В статье проведен анализ роли, места и особенностей функционирования ветроэнергетических установок в интеллектуальных электроэнергетических системах концепции Smart Grid с большой долей возобновляемых источников энергии. Приведен детальный анализ существующих ветровых агрегатов. Даны рекомендации по повышению надежности работы ветроэнергетических установок в интеллектуальных сетях.

Ключевые слова: *возобновляемые источники энергии, ветроэнергетические установки, концепция Smart Grid.*

Постановка проблемы

В настоящее время в связи с наличием проблемы исчерпания запасов ископаемых видов топлива (уголь, природный газ, торф, нефть и др.) в мире наблюдается тенденция развития и внедрения возобновляемых источников энергии (ВИЭ), из которых наиболее перспективными являются ветроэнергетические установки (ВЭУ). Однако при массовом внедрении как ВЭУ, так и других ВИЭ в электроэнергетическую систему (ЭЭС) появляется целый круг проблем, связанных с трудностями управления и поддержанием устойчивости параллельной работы. Для решения вышеуказанных проблем была разработана концепция интеллектуальной ЭЭС Smart Grid [1-4]. Однако, несмотря на это, как показано в [4], нерешенными остаются вопросы обеспечения качественной работы систем управления и систем релейной защиты и противоаварийной автоматики, особенно ВЭУ, при нестабильности первичных источников энергии (энергии ветра, солнца и т.д.). Поэтому анализ роли и места, а также проблемных моментов функционирования ветроэнергетических установок в интеллектуальных системах концепции Smart Grid является актуальным.

Анализ последних исследований и публикаций

Вопросам анализа современных ветроэнергетических установок посвящено большое количество работ [1,4-14]. В [1,6,7,9] присутствует описание ключевых особенностей основных типов ВЭУ без рассмотрения релейной защиты и автоматики. Также в [1] содержится краткая информация о системах управления ветровыми агрегатами (ВА) и роли ВА в интеллектуальных энергосистемах концепции Smart Grid. Работы [10-12,14] посвящены анализу динамических режимов ВЭУ, а вопросы реализации и функционирования ВА релейной защиты и автоматики затрагиваются в [4,13]. В существующих стандартах [5,8] содержится классификации ветровых агрегатов, но без учёта ряда особенностей современных ВЭУ.

Цель (задачи) исследования

Целью настоящей работы является проведение подробного анализа роли, места и особенностей функционирования ветроэнергетических установок в интеллектуальных электроэнергетических системах концепции Smart Grid с большой долей возобновляемых источников энергии.

Основной материал исследования

Современная ВЭУ представляет собой сложную и дорогостоящую электромеханическую систему преобразования первичной энергии ветрового потока во вторичную электрическую энергию. Ведущими производителями ВЭУ в настоящее время являются: Siemens AG (Германия), Vestas Wind Systems A/S (Дания), General Electric (США), Fuhrländer AG (Германия), Senvion SE (Германия), Nordex SE (Германия) и Enercon (Германия). Единичная номинальная мощность современных ВЭУ колеблется от нескольких киловатт до 10 МВт. Как правило, большинство ветроэнергетических установок являются трехлопастными с горизонтальной осью вращения, параллельной направлению ветрового потока. Опираясь на действующий государственный стандарт ГОСТ Р 51990, ВЭУ в зависимости от мощности подразделяют на четыре группы: первая группа (большой мощности) – свыше 1 МВт; вторая (средней мощности) – от 100 кВт до 1 МВт; третья (малой мощности) – от

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

5 до 100 кВт; четвертая (очень малой мощности) – менее 5 кВт [5]. Передовыми странами, в которых доля ВИЭ достаточно высока, являются Германия, Италия, Дания, Испания, КНР, Нидерланды и др. Например, к концу 2014 года, согласно [6,7], процент ВИЭ в Германии составлял более 20 %.

ВЭУ классифицируют по многим признакам, основными из которых являются: вид вырабатываемой энергии, мощность, признак работы с постоянной или переменной частотой вращения ветроколеса (ВК) и т.д. Согласно ГОСТ Р 51990 ВЭУ в зависимости от вида вырабатываемой энергии подразделяют на две группы: механические и электрические [1]. Электрические ветроэнергетические установки, в свою очередь, подразделяют на ВЭУ постоянного и переменного тока (рис. 1) В данной работе уделим внимание рассмотрению исключительно электрическим установкам переменного тока сетевой подгруппы.

В электрических агрегатах переменного тока принципы использования и способы управления отличаются друг от друга. Так, автономные ВЭУ рассчитаны для работы изолированно на собственную электрическую сеть с целью снабжения энергией конкретного заданного потребителя. Гибридные, или системные, ВЭУ предназначены для работы параллельно с другими энергетическими установками соизмеримой мощности (дизельные генераторы, малые ГЭС и т.п.) на общую электрическую сеть, ими образованную. Сетевые ВЭУ рассчитаны для работы непосредственно на параллельную работу с ЭЭС несоизмеримо большей мощности [1,5].

Как известно, сетевой ветроэлектрический агрегат (ВА) с электрическим генератором предназначен для параллельной работы с ЭЭС, мощность которых является бесконечно большой или большей, но соизмеримой по сравнению с номинальной мощностью самого ВА [8]. Согласно существующей нормативно-технической документации, существует два признака работы сетевых ВЭУ: при постоянной частоте вращения ВК и переменной, что проиллюстрировано на рис. 2.

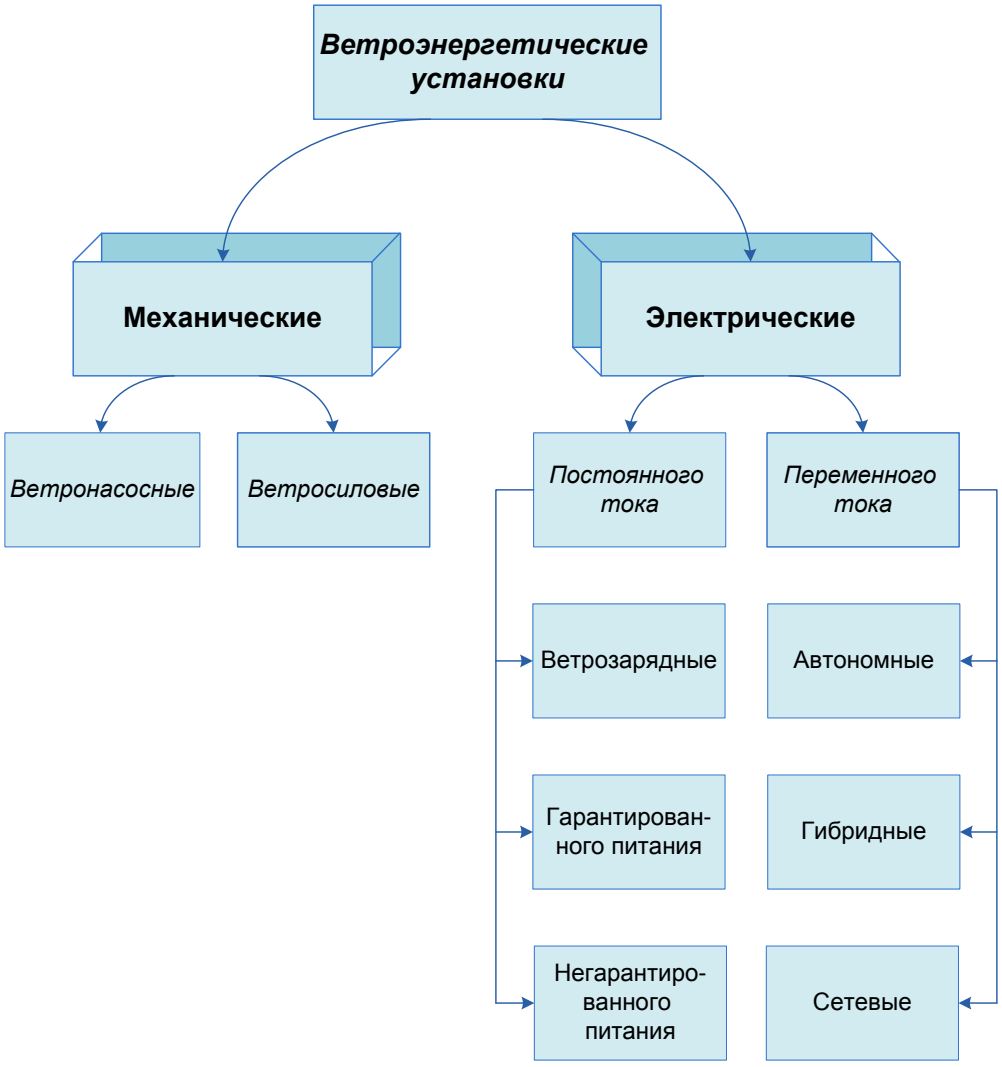


Рис. 1. Общая классификация ВЭУ

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

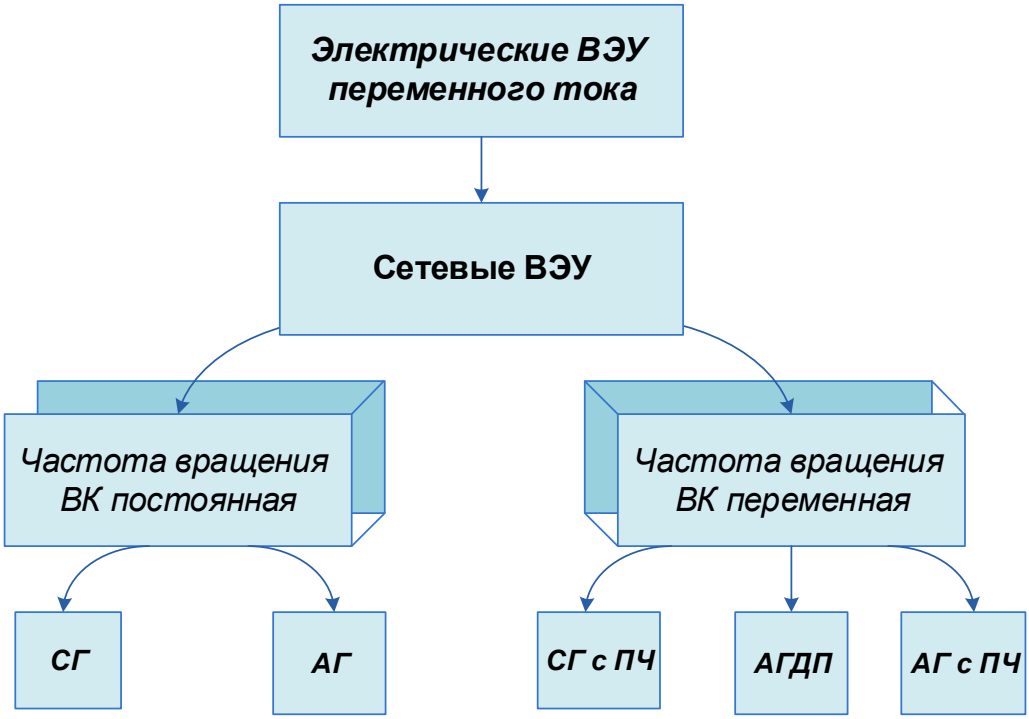


Рис. 2. Структурная схема сетевых ВЭУ

В первом случае способ управления – регулирование ВК при использовании в системе генерирования электрической энергии (СГЭЭ) либо синхронного генератора (СГ) или асинхронного генератора (АГ). Когда речь идет о втором случае, то способом управления выступает регулирование ВК и полупроводникового преобразователя частоты (ПЧ), которое может быть осуществлено раздельно или совместно. Тогда в состав СГЭЭ могут входить АГ с ПЧ, СГ с ПЧ или асинхронный генератор двойного питания (АГДП).

Анализируя существующую в странах постсоветского пространства нормативно-техническую документацию, следует отметить, что в этих документах отсутствует классификация ВЭУ по типу базирования, а именно на оффшорные (морского базирования) и береговые (наземного базирования). Также отсутствует классификация установок по наличию или отсутствию редуктора между ВК и электрическим генератором. При этом также не оговаривается, какой именно тип генератора должен входить в СГЭЭ ВЭУ конкретной группы.

На практике, исходя из современного состояния ветроэнергетики, можно выделить наиболее распространенные типы ветроэнергоустановок:

– ВЭУ на базе асинхронных генераторов с короткозамкнутым ротором (АГ с КЗР);

– ВЭУ на базе асинхронных генераторов двойного питания;

– ВЭУ на базе синхронных генераторов с классической обмоткой возбуждения на постоянном токе;

– ВЭУ на базе синхронных генераторов с постоянными (перманентными) магнитами на роторе (СГПМ).

Как правило, АГ с КЗР устанавливаются на ВЭУ мощностью до 1 МВт. ВЭУ с АГДП присутствуют в диапазоне мощности от 1 до 5 МВт. ВЭУ с СГ с постоянными магнитами, а также с классической обмоткой возбуждения применяются при мощности свыше 3 МВт.

Упрощенные схемы главных электрических соединений ВЭУ с асинхронными генераторами приведены на рис. 3.

АГ с КЗР прямого подключения в ЭЭС (рис. 3а) применяются при постоянной угловой частоте вращения независимо от скорости ветра. Ключевой особенностью подобных ВЭУ является наличие дополнительных конденсаторных батарей, необходимых для компенсации потребления реактивной мощности. К достоинствам следует отнести простоту и надежность, а также относительно низкую стоимость по сравнению с другими типами ВА. К основным недостаткам относятся: неконтролируемое потребление реактивной мощности, низкое значение КПД для скоростей ветра, отличных от номинальной, передача колебаний скорости ветра в ЭЭС, а также наличие высокого механического напряжения. Система управления ВЭУ с АГ с КЗР, а конкретно контроль выходной мощности генерации использует следующие аэродинамические принципы, такие как регулирование потери скорости (пассивный контроль) и управление по тангажу [9-11].

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

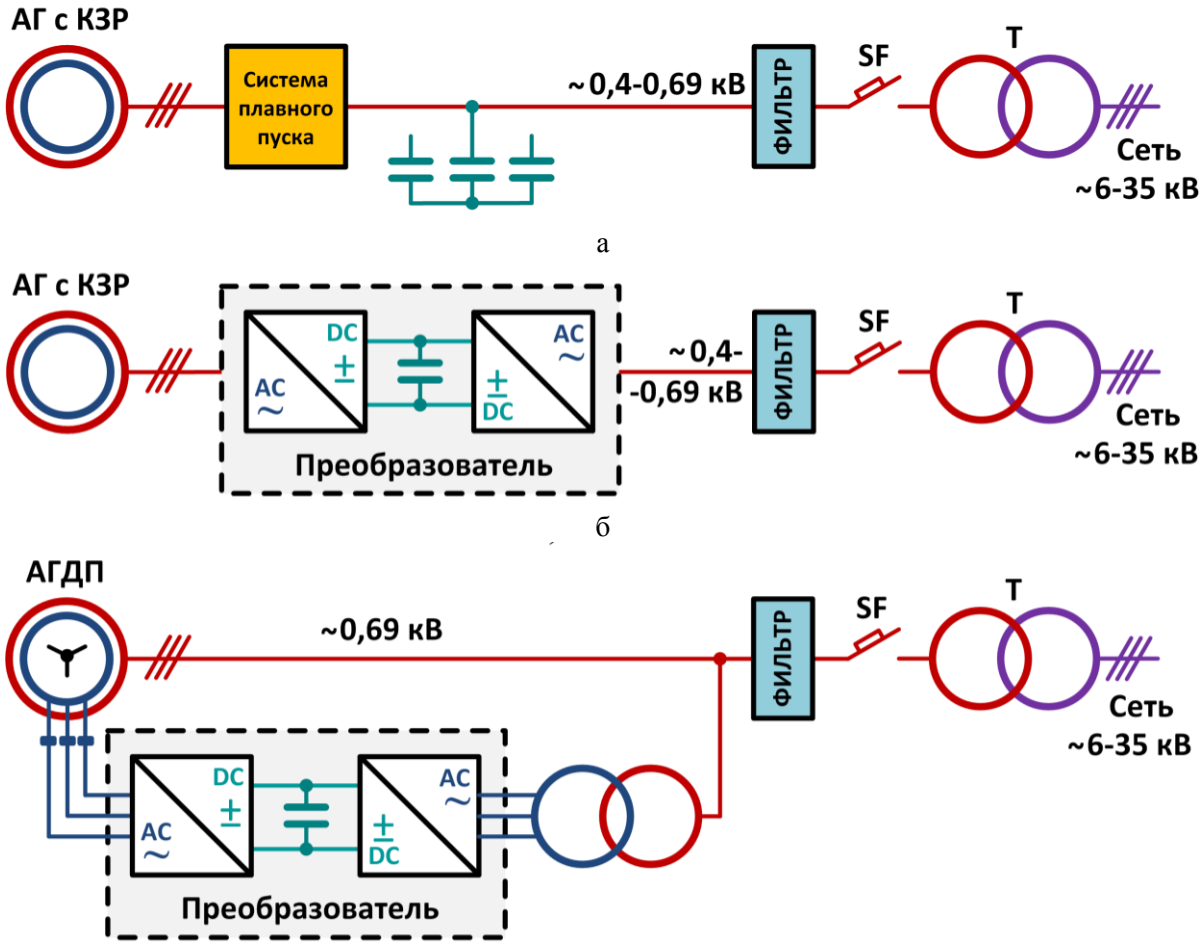


Рис. 3. Упрощенные схемы главных электрических соединений ВЭУ с АГ:
а – ВЭУ с АГ с короткозамкнутым ротором прямого подключения;
б – ВЭУ с АГ с короткозамкнутым ротором с преобразователем частоты в цепи статора;
в – ВЭУ с асинхронным генератором двойного питания

Подключение АГ с КЗР к энергосистеме через полупроводниковый ПЧ (см. рис. 3б) применяется при переменной угловой частоте вращения, что позволяет генерировать напряжение промышленной частоты. Управление выполнено в данных ВЭУ с контролем по тангажу и с контролем ПЧ на стороне генераторного напряжения. К недостаткам следует отнести снижение эффективности машины при частоте вращения вала, меньшей номинального значения, наличие проблемы регулирования реактивной мощности, а также проблемы качества напряжения генерации в связи с наличием преобразователя частоты.

На рис. 3в представлена схема ВЭУ на основе асинхронного генератора с двойным питанием. АГДП – это асинхронный генератор с фазным ротором. Трехфазная обмотка статора генератора подключена через блочный повышающий трансформатор к ЭЭС. К обмотке ротора подключен полупроводниковый ПЧ, необходимый для изменения угловой частоты вращения в определенном диапазоне. Данный диапазон ограничен как техническими характеристиками самого ПЧ, так и механическими параметрами ВА. Положительной особенностью является возможность регулирования коэффициента мощности и реактивной мощности АГДП. К недостаткам следует отнести наличие щеточного аппарата машины с фазным ротором, что сказывается на снижении надежности ВЭУ, также проблемы с качеством напряжения в сети из-за использования ПЧ. С экономической точки зрения ВЭУ с АГДП дешевле, чем установки, использующие дорогостоящие преобразователи частоты в цепи генераторного напряжения.

Система управления ВЭУ с АГДП включает контроль тангажа, контроль с ограничением максимальной мощности, или MPPT-контроллер, а также контроль ПЧ цепи фазного ротора [1,9-14].

На рис. 4 приведены упрощенные схемы главных электрических соединений ВЭУ с синхронными генераторами.

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

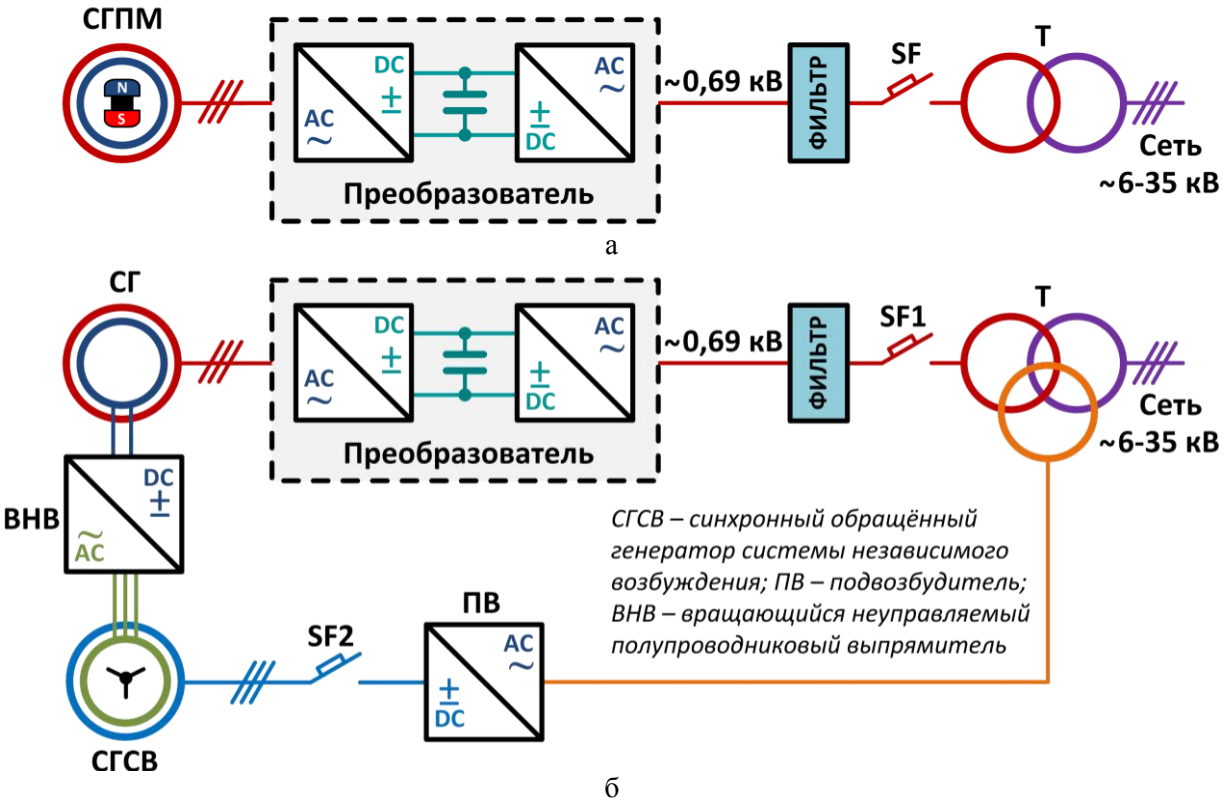


Рис. 4. Упрощенные схемы главных электрических соединений ВЭУ с СГ:
а – ВЭУ с СГПМ; *б* – ВЭУ с СГ с независимой бесщеточной системой возбуждения

Как правило, в данных ВЭУ отсутствует редуктор, что подразумевает непосредственную связь электрогенератора с ветротурбиной. Статор СГ подключается, как и в случае использования СГПМ (см. рис. 4а), так и в случае СГ с классической системой возбуждения (см. рис. 4б), к сети при помощи полупроводникового ПЧ, что позволяет турбине функционировать с регулируемой угловой частотой вращения. В настоящее время наиболее распространены ВЭУ с синхронными явнополюсными генераторами с бесщеточной системой возбуждения. СГПМ включают постоянные, или перманентные, магниты на роторе, что позволяет удешевить и упростить конструкцию.

Однако подобным машинам присущ недостаток потери требуемых магнитных свойств в процессе работы (размагничивание). Также к недостаткам вышеописанных схем с СГ можно отнести высокую стоимость ВЭУ по сравнению с другими типами ВА, влияние на ухудшение качества энергии в процессе генерации, а также наличие сложностей в управлении.

Система управления ВЭУ с СГ аналогична ветроэнергетическим установкам с АГДП [1,9].

В интеллектуальных ЭЭС концепции Smart Grid ветроэнергетические установки являются одним из ключевых ВИЭ.

Как правило, устанавливаемые ВЭУ образуют ветровые парки или ветровые электростанции суммарной мощностью от нескольких десятков киловатт до сотен МВт. Как показано в [4], при большой доле ВИЭ в ЭЭС возникает проблема поддержания требуемого уровня генерации мощности ввиду непостоянства первичных природных источников энергии. Это приводит к возникновению проблем работы устройств релейной защиты и противоаварийной автоматики (РЗиА), а также к усложнению управления. Также в отечественных стандартах и нормативных документах отсутствуют требования к построению защит ВЭУ с учетом их особенностей, что приводит к установке неэффективной стандартной защитной логики, которая некорректно работает в ряде анормальных и аварийных режимах работы, а особенно в ЭЭС Smart Grid.

Одним из решений вышеуказанных проблем является модернизация и разработка новых систем РЗиА ВЭУ, например, разработка адаптивных защит с использованием протокола МЭК (IEC) 61850 [1-4], что повлияет на повышение надежности.

Выводы

В работе произведен детальный анализ современных ветроэнергетических установок, в

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

результате которого установлено, что наиболее рациональными и экономически выгодными являются ВЭУ с асинхронными генераторами двойного питания.

Установлено, что в рамках интеллектуальной электроэнергетической системы концепции Smart Grid ветроэнергетические установки являются одним из ключевых возобновляемых источников энергии, но при этом с наличием ряда специфических особенностей функционирования.

Для повышения надежности функционирования ВЭУ предложены пути модернизации релейной защиты и автоматики за счет разработки адаптивных защит с использованием протокола МЭК (IEC) 61850.

Список литературы

1. Стычинский, З. А. Возобновляемые источники энергии: Теоретические основы, технологии, технические характеристики, экономика / З. А. Стычинский, Н. И. Воропай. – Magdeburg: Издательство Магдебургского университета имени Отто-фон-Герике (Die Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg) docupoint GmbH, 2010. – 209 с.
2. Официальный сайт компании Siemens (Сименс) Smart grid [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://w3.siemens.com/ smartgrid/ global/en/Pages/Default.aspx
3. Лукьянченко, С.А. Проблемы управления в Smart grid системах / С.А. Лукьянченко // Вестник ДонНТУ. – № 1(7). – 2017. – С.38-42.
4. Ткаченко, С.Н. Пути совершенствования релейной защиты и автоматики современных ветроэнергетических установок / С.Н. Ткаченко, А.В. Коваленко, М.В. Тельная // Инновационные перспективы Донбасса: материалы II Международной научно-практической конференции. Секция «Перспективы развития электротехнических, электромеханических и энергосберегающих систем», 25-26 мая 2016 г., г. Донецк. Т. 2. – Донецк: ДонНТУ, 2016. – С. 255-261.
5. ГОСТ Р 51990-2002. Нетрадиционная энергетика. Ветроэнергетика. Установки ветроэнергетические. Классификация. – Введ. 01.07.2003. – Москва: Издательство стандартов, 2003. – 8 с.
6. Janssen, K. Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES) Windenergie report Deutschland 2014 / K. Janssen [et al.]. – Ochsenfurt-Hohestadt: Konrad Triltsch GmbH. – 116 p.
7. Wind turbine plant capabilities report. 2013 Wind Integration Studies. – AEMO: Australian Energy Market Operator. – ABN 94 072 010 327. – 62 p.
8. ГОСТ Р 51237-98. Нетрадиционная энергетика. Ветроэнергетика. Термины и определения. – Введ. 30.06.1999. – Москва: Издательство стандартов, 1999. – 12 с.
9. Соколовский, Ю.Б. Современные ветроэнергетические установки (обзор) / Ю.Б. Соколовский, А.Ю. Соколовский // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. – Т. 2. – № 4. – 2015. – С. 27-38.
10. Snyder, M. A. Development of Simplified Models of Doubly-Fed Induction Generators (DFIG). A contribution towards standardized models for voltage and transient stability analysis: Master of Science thesis / Michael A. Snyder. – Dep. of Energy and Environment, Division of Electric Power Engineering: Chalmers University of Technology. – Göteborg, Sweden, 2012. – 106 p.
11. Petersson, A. Analysis, Modeling and Control of Doubly-Fed Induction Generators for Wind Turbines: thesis for the degree of Doctor of Philosophy /Andreas Petersson. – Department of Energy and Environment, Division of Electric Power Engineering: Chalmers University of Technology. – Göteborg, Sweden, 2005. – 176 p.
12. Y. Mahesh Babu. Fault analysis of wind generator connected power system using wavelet technique / Y. Mahesh Babu, B. Durga Prasad, B. Vijay Vihari // Proceeding of the IEEE International Conference on Green Computing, Communication and Electrical Engineering (ICGCCEE'14), 6th-8th March, 2014, Coimbatore, India. – IEEE, 2014. – 1744 p.
13. Brady, C., D'Alfonso, N. Investigation of relay protection systems in MV networks with large in-feed of distributed generation: Master's thesis / Cormac Brady, Nicola D'Alfonso. – Dep. of energy technology. M. Sc. in electrical power systems and high voltage engineering. – Aalborg, Denmark, 2014. – 110 p.
14. Qureshi, Waqar A. Performance Assessment and Management of Large Wind Farms under Abnormal Grid Operating Conditions: PHD thesis / Wagar Ahmed Qureshi. – Department of Electrical and Computer Engineering, University of Auckland. – Auckland, New Zealand, 2013. – 180 p.

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

S.N. Tkachenko /Cand. Sci. (Eng.) /, A.V. Kovalenko, A.V. Panfilov
Donetsk National Technical University (Donetsk)

THE ROLE AND PLACE OF WIND POWER INSTALLATIONS IN SMART GRID POWER SYSTEMS

Background. *The paper considers the analysis of the role, place, and features of the functioning of wind power installations in intelligent electronic systems of smart grid concept with a large share of renewable energy sources. A detailed analysis of the existing wind turbines made. Recommendations to improve the reliability of wind turbines in intelligent networks given.*
Materials and/or methods. *The analysis of the existing normative and technical documentation, publications and literature devoted to the problems of introducing alternative energy sources into the Smart Grid intelligent networks carried out.*
Results. *The detailed analysis of modern wind power installations made, which established that the most rational and cost-effective are wind turbines with asynchronous dual power supply generators. Also established that within the framework of the Smart Grid concept, wind turbines are one of the key renewable energy sources, but with a number of specific features of operation.*
Conclusion. *The results are recommendations to improve the reliability of wind turbines. Ways of modernization of relay protection and automation by means of development of adaptive protections with the use of the IEC 61850 Protocol offered.*

Keywords: *renewable energy sources, wind power installations, Smart Grid concept.*

Сведения об авторах
С.Н. Ткаченко
SPIN-код: 5046-6030
Телефон: +380 (62) 301-03-72
Эл. почта: tsn1981@mail.ru
А.В. Панфилов
Телефон: +380 (62) 301-03-72
Эл. почта: alexey.panfilov.924@gmail.com
А.В. Коваленко
SPIN-код: 8432-3428
Телефон: +380 (62) 301-03-72
Эл. почта: anna.kovalenkoETF@gmail.com

Статья поступила 06.03.2018 г.
© С.Н. Ткаченко, А.В. Коваленко, А.В. Панфилов, 2018
Рецензент д.т.н., доц. И.А. Бершадский



ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

УДК 621.783.2

А.Б. Бирюков /д.т.н./, С.И. Гинкул /к.т.н./, П.А. Гнитиёв /к.т.н./
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)
А.А. Иванова /к.т.н./
ГУ «Институт прикладной математики и механики» (Донецк)

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ПЕЧЕЙ С ШАГАЮЩИМИ БАЛКАМИ

Создана прогнозная математическая модель тепловой работы печи с шагающими балками, которая базируется на решении дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности в двухмерной постановке (для произвольного поперечного сечения сортовой заготовки). На основании анализа результатов проведенных численных экспериментов сделан вывод, что для конкретной печи качественный нагрев при заданных температурах зон можно получить только при определенных соотношениях между производительностью печи и расстоянием между заготовками.

Ключевые слова: *печь с шагающими балками, прогнозная математическая модель, температурное поле металла, качественный нагрев, зазор между заготовками, производительность печи.*

Постановка проблемы

Современное металлургическое производство характеризуется наличием высокопроизводительных технологических комплексов, в которых значительную роль играют печи, предназначенные для нагрева металла перед горячей обработкой давлением. В настоящее время одним из основных направлений совершенствования работы печей является использование математических моделей (в том числе и прогнозных моделей), описывающих их тепловую работу, то есть влияние технологических и конструктивных параметров на температурное поле металла.

Анализ последних исследований и публикаций

Одним из самых современных типов проходных печей, предназначенных для нагрева слябов и сортовых заготовок, в настоящее время являются печи с шагающими балками [1,2]. Известно множество разработанных и успешно используемых математических моделей тепловой работы различного рода печей [3,4].

При этом затруднительно использовать математические модели в полной постановке, в которых математическая формулировка задачи помимо дифференциального уравнения теплопроводности включает уравнения, описывающие аэродинамические процессы в печи и теплообмен излучением. Такой подход, повышая точность исследования, приводит к значительному усложнению задачи с алгоритмической точки зрения и загрузки вычислительных ресурсов. Адаптация таких моделей также является сложной задачей. В результате их использование в качестве прогнозного компонента становится затруднительным. В работе [5] представлена прогнозная математическая модель для поддержки конструкторской проработки печей с шагающими балками.

Цель (задачи) исследования

Целью данной работы является создание прогнозной математической модели, позволяющей изучать влияние технологических параметров на температурное поле металла в конкретной печи с шагающими балками, и иллюстрация возможностей ее использования.

Основной материал исследования

Исходными величинами для разрабатываемой модели являются количество зон печи, схема отопления, геометрические размеры печи, геометрические параметры ограждающей конструкции и теплофизические свойства использованных для ее создания материалов; используемое топливо, температурный режим каждой зоны и пределы регулирования температурного режима каждой зоны, производительность печи.

Количество заготовок, одновременно находящихся в печи, определяется зависимостью [6]:

$$nz = \frac{L}{l_x + aa},$$

где L – длина печи, м; l_x – ширина заготовки, м; aa – расстояние между заготовками, м.

Масса одной заготовки, кг:

$$g = l_x \cdot l_y \cdot l_z \cdot \rho,$$

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

где l_x, l_y, l_z – ширина, толщина и длина одной заготовки, м; ρ – плотность металла, кг/м^3;

Масса металла, одновременно находящегося в печи, кг:

$$G=nz\cdot g\ .$$

Время нагрева, с:

$$\tau=\frac{G}{P},$$

где G – масса металла, кг; P – производительность печи, кг/с.

Время нагрева металла в методической зоне определяется по формуле, с:

$$\tau_{мет}=\frac{L_{мет}\cdot\tau_0}{L},$$

где $L_{мет}$ – длина методической зоны, м; L – общая длина печи, м; τ_0 – суммарное время нагрева металла в печи.

Аналогично определяется время нагрева в других зонах.

Длина заготовок, нагреваемых в методических печах, во много раз больше ширины и толщины, поэтому изменением температуры по длине заготовки можно пренебречь.

В методических печах с шагающими балками нагрев заготовок квадратного и прямоугольного сечения происходит с 4-х сторон. Изменение температуры металла по толщине и ширине можно определить, решая двухмерное уравнение теплопроводности:

$$\frac{\partial t}{\partial\tau}c(t)\,p(t)=\frac{\partial}{\partial x}\left[\lambda(t)\frac{\partial t}{\partial x}\right]+\frac{\partial}{\partial y}\left[\lambda(t)\frac{\partial t}{\partial y}\right],\quad(1)$$

с начальными условиями:

$$\tau=0\ ;\quad t(x,y,0)=t_n;\qquad(2)$$

и граничными, установленными в соответствии с [7] и рис. 1:

$$\begin{aligned}
-\lambda\frac{\partial t}{\partial x}\Big|_{x=0}&=\alpha_{изл1x}(t_{печ1x}-t_{0,y.\tau})\\
-\lambda\frac{\partial t}{\partial x}\Big|_{x=lx}&=\alpha_{изл2x}(t_{печ2x}-t_{lx,y.\tau})\\
-\lambda\frac{\partial t}{\partial y}\Big|_{y=0}&=\alpha_{изл1y}(t_{печ1y}-t_{x,0.\tau})\\
-\lambda\frac{\partial t}{\partial y}\Big|_{y=ly}&=\alpha_{изл2y}(t_{печ2y}-t_{x,ly.\tau})
\end{aligned}\qquad(3)$$

В печах с шагающими балками заготовки располагают с зазорами, что значительно ускоряет их нагрев [6]. При этом боковые грани заготовок получают тепло в основном излучением от верхней и нижней частей печи.

Для описания лучистого теплообмена используется схема нагрева, приведенная на рис. 2.

Приведенный коэффициент излучением к верхней поверхности заготовки $C_{г.к.м2}$ рассчитываем по формуле В.Н. Тимофеева:

$$C_{г.к.м2}=c_0\cdot\varepsilon_м\cdot\varepsilon_г\frac{\psi_{к.м2}\cdot(1-\varepsilon_г)+1}{\psi_{к.м2}\cdot(1-\varepsilon_г)\left(\varepsilon_м+\varepsilon_г\cdot(1-\varepsilon_м)\right)+\varepsilon_г},$$

где c_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела, Вт/(м·К^4); $\varepsilon_г$, $\varepsilon_м$ – степень черноты газа и степень черноты металла; $\psi_{к.м2}$ – угловой коэффициент излучением кладки на верхнюю поверхность заготовки, равный:

$$\psi_{к.м2}=\frac{l}{(l+a)}.$$

Для оценки теплоотдачи излучением в зазоре вводится условная поверхность 3, которая отличается от степени черноты металла:

Приведенный коэффициент излучением $C_{г.к3}$:

$$C_{г.к.3}=c_0\cdot\varepsilon_3\cdot\varepsilon_г\frac{\psi_{к.3}\cdot(1-\varepsilon_г)+1}{\psi_{к.3}\cdot(1-\varepsilon_г)(\varepsilon_3+\varepsilon_г\cdot(1-\varepsilon_3))},$$

где

$$\psi_{к.м2}=\frac{a}{(l+a)}.$$

$$\varepsilon_3=\frac{1}{1+\dfrac{a}{2l_y+a}}\cdot\left(\frac{1}{\varepsilon_м}-1\right).$$

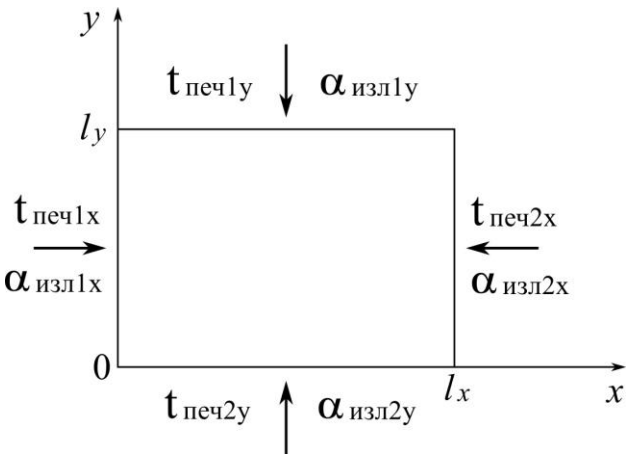


Рис. 1. К рассмотрению граничных условий

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

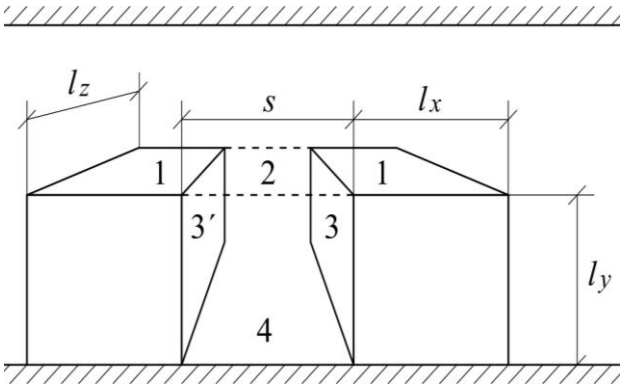


Рис. 2. Схема нагрева заготовок в печах с шагающими балками:
l_x, l_y – поверхность заготовки;
1 – поверхность заготовки;
2 – условная поверхность;
3 – боковая поверхность;
4 – открытая поверхность пода

Для определения приведенного коэффициента излучением $C_{г.к.м4}$ необходимо вычислить угловой коэффициент ψ_{43}:

$$\psi = \left[\left(1+\frac{a}{l_y}\right) - \sqrt{1+\left(\frac{a}{l_y}\right)^2}\right].$$

Приведенный коэффициент излучением $C_{г.к.м4}$ равняется:

$$C_{г.к.м4} = c_0 \cdot \varepsilon_3 \cdot \varepsilon_г \frac{\psi_{43}\cdot(1-\varepsilon_г)+1}{\psi_{43}\cdot(1-\varepsilon_г)(\varepsilon_3+\varepsilon_г\cdot(1-\varepsilon_3))+\varepsilon_г}.$$

Уравнение (1) с начальными условиями (2) и граничными (3) решалось по конечно-разностной схеме [2].

Коэффициент теплоотдачи излучением определяется из уравнения [8]:

$$\alpha_{изл} = \frac{c_{г.м}\cdot\left[\left(\frac{T_г}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_м}{100}\right)^4\right]}{t_г - t_м}.$$

Разработанный алгоритм позволяет выполнить моделирование температурного поля металла для произвольного расстояния между заготовками и в случае, когда заготовки располагаются без зазора между ними.

Оценка адекватности проведена путем сопоставления результатов, полученных с ее помощью, с литературными данными [6]. Для тестовых условий расхождение результатов не превышало 5 %.

Для иллюстрации использования модели проведен ряд численных экспериментов с целью решения вопросов:

– о влиянии производительности печи при неизменном расстоянии между заготовками и зафиксированном распределении температур по зонам печи на температурное поле металла и расход топлива;

– о влиянии зазора между заготовками при неизменных производительности печи и распределении температур по зонам печи на температурное поле металла.

Исходные данные для проведения численных экспериментов:

– геометрия нагреваемых слябов l_xxl_yxl_z, м 0,3x0,21x10,5;

– длины зон печи: методической $L_{мет}$, м – 6,72; 1-й сварочной $L_{св1}$, м – 13,12; 2-й сварочной $L_{св2}$, м – 10,83; томильной $L_{том}$, м – 6,72;

– теплота сгорания топлива (природно-доменная смесь) $Q_н^р$, МДж/м^3 20,9.

Табл. 1. Данные моделирования нагрева заготовок при различной производительности и одинаковом расстоянии между заготовками

Производительность, P, кг/с	Время нагрева, с	Расстояние между заготовками, aa, м	Температура, °С		Расход топлива	
			Поверхности, $t_п$	Середины, $t_ц$	B, м^3/с	$B_{дым}$, м^3
66,67	7087	0,1	1250	1176	5,415	$3{,}844\cdot10^4$
77,22	6543	0,1	1237	1150	5,829	$3{,}82\cdot10^4$
77,78	6085	0,1	1223	1123	6,243	$3{,}799\cdot10^4$

Табл. 2. Результаты моделирования нагрева металла при одинаковой производительности печи и различном расстоянии между заготовками

Производительность P, кг/с	Время нагрева τ, с	Количество заготовок в печи, nz	Расстояние между заготовками, aa, м	Температура металла °С		Расход топлива	
				поверхности, $t_п$	середины, $t_п$	B, м^3/с	$B_{дым}$, м^3
66,67	7087	91	0,1	1250	1176	5,415	$8{,}044\cdot10^4$
66,67	5687	73	0,2	1231	1134	5,415	$3{,}085\cdot10^4$
66,67	4751	61	0,3	1209	1081	5,415	$2{,}219\cdot10^4$

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Для изучения первого вопроса производительность печи варьировалась от 66,67 до 77,78 кг/с. В табл. 1 приведены результаты моделирования нагрева металла при разной производительности и одинаковом расстоянии между заготовками *aa*=0,1 м.

Из анализа результатов, представленных в табл. 1, можно заключить, что при увеличении производительности печи время нагрева уменьшается, в связи с этим конечная температура нагрева снижается, перепад температуры между поверхностью и серединой заготовки увеличивается. Так, при производительности *P*=66,67 кг/с перепад температур по сечению составлял Δt=1250-1176=74 °С, а при производительности *P*=77,78 кг/с перепад температур составил Δt=100 °С. Секундный расход топлива с увеличением производительности увеличивается, а итоговый удельный расход незначительно уменьшается, поскольку время нагрева уменьшается.

Для изучения второго вопроса при неизменной производительности печи 66,67 кг/с расстояние между заготовками варьировалось от 0,1 до 0,3 м. Полученные результаты представлены в табл. 2.

Из анализа результатов, представленных в табл. 2, можно заключить, что увеличение расстояния между заготовками приводит к уменьшению количества заготовок в печи, а это приводит к сокращению времени нагрева заготовок. Секундный расход топлива остается постоянным для различного расстояния между заготовками. Увеличение расстояния между заготовками приводит к снижению итогового удельного расхода топлива. Уменьшение времени нагрева не обеспечивает нагрев металла до заданного качества. Так, при расстоянии между заготовками *aa*=0,1 м металл на поверхности нагревается до $t_п$=1250 °С, а середина – до $t_ц$=1176 °С. При расстоянии *aa*=0,3 м температура поверхности равняется $t_п$=1209 °С, а середины – $t_ц$=1081 °С. По технологии нагрева температура поверхности должна равняться $t_п$=1250 °С, а середины – $t_ц$=1200 °С.

Выводы

Создана прогнозная математическая модель тепловой работы печи с шагающими балками, предназначенная для изучения влияния технологических параметров на температурное поле металла, нагреваемого в печи с заданным набором конструктивных параметров.

На основании анализа результатов проведенных численных экспериментов сделан вывод: на действующей печи качественный нагрев металла можно получить только при определенном соотношении между производительностью печи и расстоянием между заготовками.

Список литературы

1. Курбатов, Ю.Л. Металлургические печи: учеб. пособие для вузов / Ю.Л. Курбатов, Ю.Е. Василенко. – Донецк: ГВУЗ «ДонНТУ», 2013. – 388 с.
2. Ткаченко, В.Н. Математическое моделирование, идентификация и управление технологическими процессами тепловой обработки материалов / В.Н. Ткаченко. – Т. 13. – Сер. «Задачи и методы: математика, механика, кибернетика». – Киев: Наукова думка, 2008. – 244 с.
3. Бирюков, А.Б. Математические модели тепловой обработки металла в печах / А.Б. Бирюков, П.А. Гнитиёв // Черная металлургия. – 2016. – № 11 (1403). – С. 56-63.
4. Biryukov, A.B. Mathematical model for studying of metal air-cooling process in furnaces / A.B. Biryukov, P.A. Gnitiev, A.I. Voloshin // Steel in Translation. – 2015. – V. 45. – No.7. – P. 534-538.
5. Гинкул, С.И. Прогнозная математическая модель процесса нагрева металла в печах с шагающими балками / С.И. Гинкул и др. // Металлург. – 2018. – № 1. – С. 24-28.
6. Мастрюков, Б.С. Расчеты нагревательных печей / Б.С. Мастрюков. – М.: Металлургия, 1986. – 376с.
7. Biryukov, A.B. Experimental investigation of convective heat exchange in chamber furnaces at heat treatment of cylindrical solids / A.B. Biryukov, P.A. Gnitiev // Thermophysics and Aeromechanics. – 2016. – Vol. 23. No. 3. – P. 467-472.
8. Heat and mass transfer / S.I. Ginkul [et al.]. – Donetsk: Nord-Press, 2006. – 292 p.

A.B. Biryukov /Dr. Sci. (Eng.)/, S.I. Ginkul /Cand. Sci. (Eng.)/, P.A. Gnitiev /Cand. Sci. (Eng.)/
Donetsk National Technical University (Donetsk)
A.A. Ivanova /Cand. Sci. (Eng.)/
Institute of Applied Mathematics and Mechanics (Donetsk)

MATHEMATICAL MODELING OF FURNACES OPERATION WITH WALKING BEAMS

Background. *An important task is the development of predictive mathematical models for furnaces with walking beams, allowing quick assessment of the thermal condition of the metal under the influ-*

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

ence of a certain combination of technological factors. At the same time, it is difficult to use mathematical models in a complete formulation in which the mathematical formulation of the problem, in addition to the differential equation of thermal conductivity, includes equations describing aerodynamic processes in the furnace and heat transfer by radiation. This approach, increasing the accuracy of the study, leads to a significant complication of the problem from an algorithmic point of view and loading computing resources. The adaptation of such models is a challenging task. The objective of this paper is to create a simplified predictive mathematical model that allows for the conditions of a specific furnace to perform a quick analysis of the process tested parameters influence on the temperature field of the metal.

Materials and/or methods. *The developed predictive mathematical model based on the solution of the differential equation of unsteady thermal conductivity in a two-dimensional formulation (for an arbitrary cross-section of a billet). In setting the boundary conditions of heat exchange, considered that, when placing a billet with a gap, the radiant heat flux falls on its lateral faces. The adequacy of the model is confirmed by comparing the obtained results with the literature data.*

Results. *The result of the numerical experiments shows that for the adopted geometrical parameters of the furnace, when the distance between the billets is 0.1 m, the productivity increase from 66.67 kg/s to 77.78 kg/s leads to an increase of the temperature drop across the thickness of the billet by 26°C; at a constant furnace productivity of 66.67 kg/s the change in the distance between billets from 0.1 to 0.3 m leads to a decrease in fuel consumption, however, the temperatures of the surface and center decrease to 41 and 119°C, respectively, and the difference between centre and surface increases by 78°C.*

Conclusion. *In the paper, the predictive mathematical model for describing the thermal operation of the furnace with walking beams developed and tested which allows evaluating the influence of the process parameters on the temperature field of the metal. The conclusion is that for a particular furnace, high-quality heating at specified zone temperatures can be obtained only at specific ratios between the performance of the furnace and the distance between the billets.*

Keywords: *furnace with walking beams, predictive mathematical model, temperature field of metal, high-quality heating, the gap between billets, furnace productivity.*

Сведения об авторах

А.Б. Бирюков
SPIN-код: 3186-0680
Author ID: 7006918782
ORCID iD: 0000-0002-8146-2017
Телефон: +380 (62) 301-08-61
Эл. почта: birukov.ttf@gmail.com

С.И. Гинкул
SPIN-код: 7667-2980
Author ID: 6508301176
ORCID iD: 0000-0002-6521-0645
Телефон: +380 (62) 301-08-61
Эл. почта: ginkul.si@gmail.com

А.А. Иванова
SPIN-код: 6560-2868
Author ID: 54935647300
ORCID iD: 0000-0003-0573-8859
Телефон: +380 (62) 311-04-36
Эл. почта: ivanova.iamm@mail.ru

П.А. Гнитиёв
SPIN-код: 1943-4196
Author ID: 56916104300
ORCID iD: 0000-0001-9266-7969
Телефон: +380 (62) 301-08-34-71
Эл. почта: gnitiev.pavel@gmail.com

Статья поступила 01.03.2018 г.
© А.Б. Бирюков, С.И. Гинкул. А.А. Иванова, П.А. Гнитиёв, 2018
Рецензент д.т.н., доц. Н.И. Захаров



ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

УДК 662.7:552.57

Л.Ф. Бутузова /д.х.н./, В.А. Колбаса, Г.Н. Бутузов /к.х.н./
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)
В.Н. Шевкопляс /к.х.н./
ГУ «Институт физико-органической химии и углехимии» (Донецк)

СТРУКТУРНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ПЕРЕРАБОТКИ УГЛЕЙ МЕТОДОМ ПОЛУКОКСОВАНИЯ

В работе установлено наличие корреляционных связей между структурно-групповым, элементным составом твердых топлив, их растворимостью в органических растворителях и поведением при термической переработке.

Ключевые слова: *уголь, пиролиз, структура, коэффициент корреляции, диспропорционирование водорода.*

Постановка проблемы

В конце XX в. политика стран развитого капитализма в области энергетической безопасности претерпела значительные изменения. В национальные интересы прочно вошло понятие «региональные углеводородные ресурсы». Изменение политики в сфере первичных энергоносителей и источников жидких углеводородов дали толчок так называемой сланцевой революции в США. В 2012 году корпорация Shell начала разведывательные работы на «Юзовской площадке». Однако в феврале 2014 г. представитель Первомайской райгосадминистрации сообщил, что запасы сланцевого газа, которые прогнозировались на уровне 4 млрд. м^3, по данным пробного бурения не подтвердились. Поэтому весьма целесообразно в современных реалиях не только разведывать новые источники углеводородных ресурсов, но и стараться максимально полно и рационально перерабатывать традиционные горючие ископаемые, в первую очередь энергетические угли, не пригодные для коксования.

Анализ последних исследований и публикаций

Технологии прямого сжигания сопровождаются выбросами в атмосферу тысяч тонн пыли, оксидов углерода, азота, токсичных фуранов и диоксинов, а также накоплением зольных отвалов, отравляющих окружающую среду [1].

Очевидные преимущества имеют процессы комплексной переработки топлива, основанные на нагревании углей без доступа воздуха. Одним из таких процессов является низкотемпературный пиролиз, или полукоксование, который проводится обычно при 480-650 °С. Полукоксование как технический процесс менее распространено, чем коксование. В то же время твердые, жидкие и газообразные продукты низкотемпературного пиролиза углей имеют важные полезные свойства, представляющие ценность для использования в промышленных процессах. Смола, выход которой превышает 20 % органической массы, содержит до 50 % фенольного сырья. Она может служить ценнейшим продуктом для получения жидких моторных и котельных топлив. Тяжелая фракция полукоксовой смолы после несложной очистки представляет собой аналог топочного мазута с низким содержанием серы. Легкосредняя масляная фракция, составляющая до 2/3 общего количества смолопродуктов, получаемых при пиролизе угля, является отличным сырьем для получения высококачественного моторного топлива и широкой гаммы ценных продуктов различного назначения. Даже без дополнительной переработки смола может использоваться в качестве дорожного битума [2,3].

Газ полукоксования имеет высокую теплотворную способность (более 20 МДж/м^3). Кроме того, особую ценность ему придает высокое содержание непредельных углеводородов.

Твердый продукт пиролиза – полукокс, по своим физическим и теплотехническим свойствам является высококачественным топливом, пригодным для эффективного сжигания в энергетических агрегатах, газификации и др. Полукокс может использоваться в ряде отраслей промышленности, в частности при выплавке стали в кислородных конверторах; в качестве отощающей добавки в шихту при получении доменного и специальных видов кокса; во внедоменных процессах, проводимых с применением металлургического кокса; в доменном производстве путем прямого вдувания полукокса в домну, что позволяет частично заменить дорогостоящий металлургический кокс; в цветной металлургии для частичной или полной замены мелких сортов металлургического кокса; в качестве бытового без-

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

дымного высококалорийного и чистого топлива; в химической промышленности и производстве стройматериалов, а также для других целей.

Важно отметить, что выход продуктов полукоксования – это показатель, отражающий химическую природу, строение и свойства органической массы углей. Он является одним из классификационных параметров, широко использующихся в промышленности для оценки технологических характеристик твердых горючих ископаемых (ТГИ) с целью более эффективного их использования в различных процессах конверсии. Наибольшее количество ненасыщенных и нестабильных продуктов разложения угля образуется в диапазоне 350-500 °С.

Протекающие на стадии полукоксования превращения лежат в основе большинства других процессов промышленной переработки ТГИ, поэтому полукоксование интересно не только как технологический процесс, но и как высокоинформативный метод исследования поведения углей при термической деструкции. При этом термическая устойчивость органической массы топлив определяется не только энергией разрыва определенных химических связей, а в значительной мере другими факторами, такими как образование и развитие пространственной системы полисопряжения, стерические затруднения, способность образовывать межмолекулярные и внутримолекулярные ассоциаты и др. Очевидно, что разработка эффективных методов переработки углей должна базироваться на данных структурно-химических показателей, характеризующих органическую массу конкретного угля (ОМУ). Эти показатели формируются по данным технического, элементного, петрографического и функционального анализов. Однако из-за сложности структуры ОМУ исследователи, как правило, ограничиваются описанием корреляционных уравнений, показывающих зависимости свойств углей от различных структурных характеристик – индексов [4]. Описанные в углехимической литературе корреляции преимущественно касаются связи между свойствами углей, их техническим и элементным составом. С нашей точки зрения, значительный интерес представляет изучение взаимосвязи между групповым составом углей, определенным методом ИК-спектроскопии, и их технологическими характеристиками.

Цель (задачи) исследования

Целью настоящей работы является оценка изменений элементного и функционального состава органической массы углей в процессе полукоксования и установление взаимосвязи между этими изменениями и выходом продуктов пиролиза, а также продуктов, растворимых в органических растворителях.

Основной материал исследования

Для реализации поставленной задачи использовали совокупность термических и физико-химических методов исследования.

Полукоксование проводили классическим методом в реторте Фишера – метод определения выхода продуктов полукоксования (ГОСТ 3168-93, ИСО 647-74).

Элементный и технический анализы образцов выполнены по ГОСТ 12113-94, ГОСТ 27314-91, ГОСТ 11022-95.

ИК-спектры углей и полукоксов регистрировали на спектрометре Bruker FTS-7 с использованием техники DRIFT в Институте органической химии с центром фитохимии Болгарской академии наук. Угли для анализа готовили в форме 5 %-ных смесей с бромидом калия. ИК-спектры образцов снимали в области волновых чисел γ=4000–400 $см^{-1}$. Коррекцию базовой линии проводили с использованием компьютерной программы Origin. Корреляционные связи были определены с помощью программы Microsoft Excel 2016 (рис. 1-4).

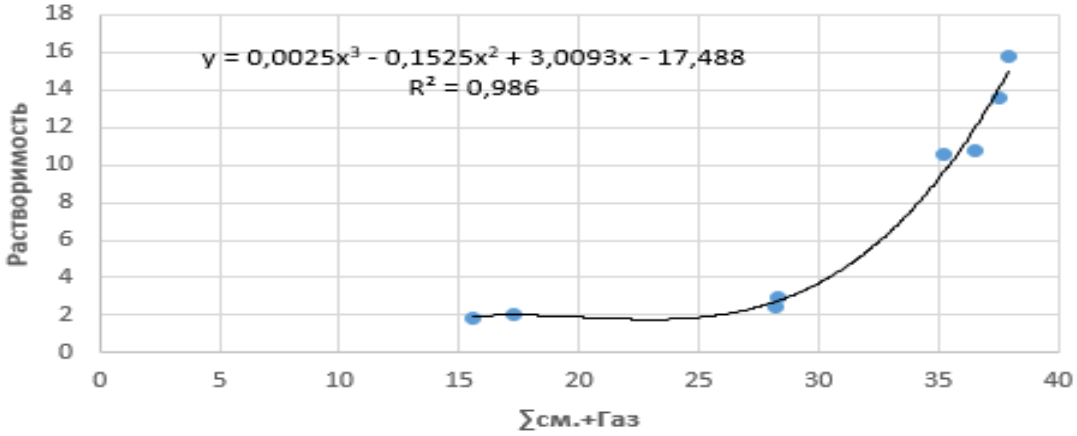


Рис. 1. Зависимость выхода смолы и газа от растворимости количественного состава кислород- и серосодержащих групп [8]

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

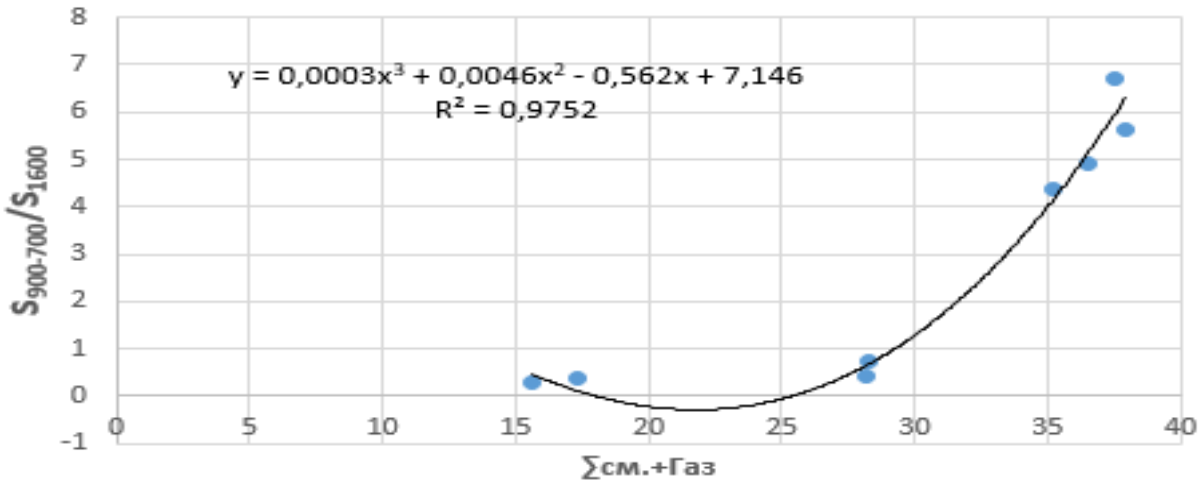


Рис. 2. Зависимость выхода смолы и газа от отношения площадей полос поглощения $S_{900\text{-}700}/S_{1600}$

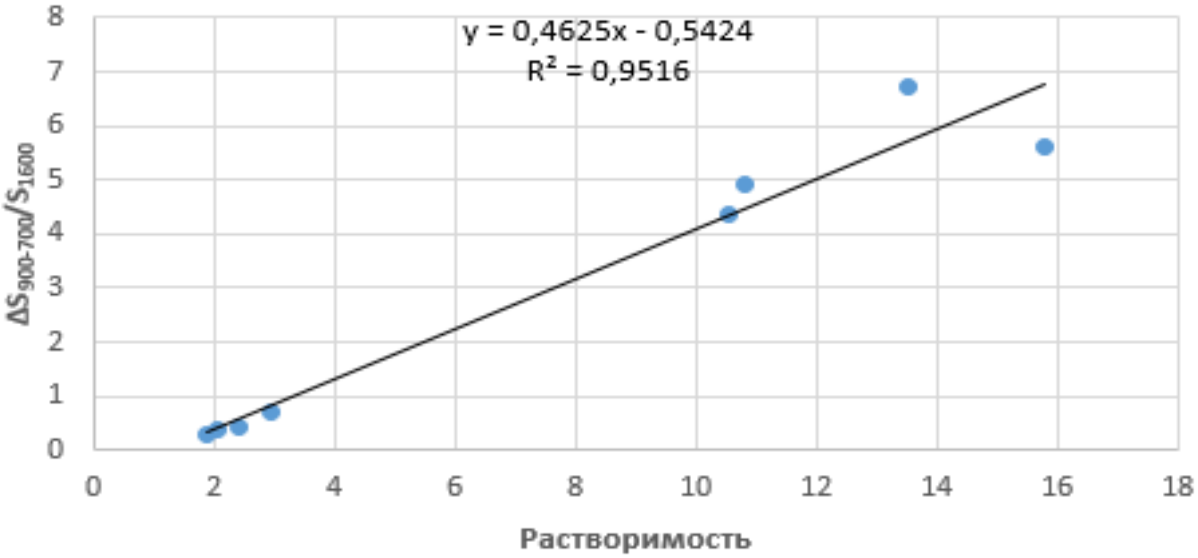


Рис. 3. Зависимость растворимости от изменения отношения площадей полос поглощения $\Delta S_{900\text{-}700}/S_{1600}$

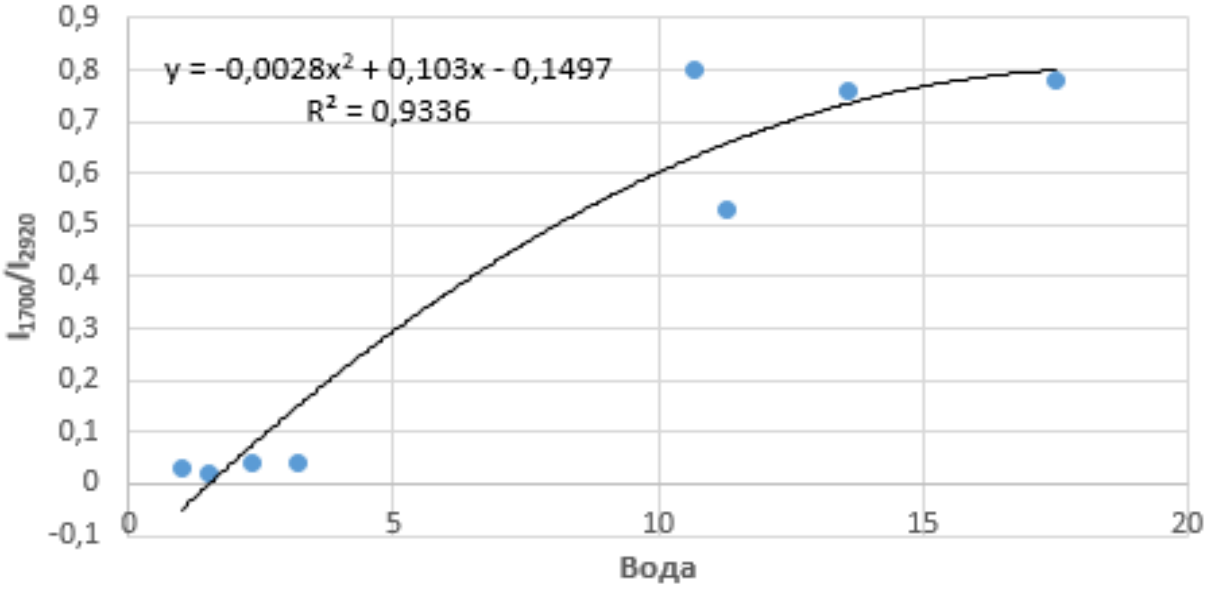


Рис. 4. Зависимость выхода пирогенетической влаги от отношения интенсивности полос поглощения I_{1700}/I_{2920}

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Угли экстрагировали дихлорметаном при температуре 75 °С и давлении 50 бар [5].

В качестве объектов исследования использовали пары восстановленных и слабовосстановленных углей Донецкого бассейна низкой и средней стадии метаморфизма. Характеристика исходных углей приведена в табл. 1 [6].

Как видно из табл. 1, угли восстановленного типа *в,* в сравнении с их изометаморфными парами типа *а*, отличаются повышенным содержанием водорода, серы и большим выходом летучих веществ. Все отобранные угли содержат более 80 % микрокомпонентов группы витринита.

В табл. 2 представлены данные определения выхода продуктов полукоксования, выхода экстрактов, а также результаты изучения элементного состава и DRIFT-спектров исследуемых углей и их полукоксов. На основании этих данных вычислены изменения указанных характеристик в процессе полукоксования, которые приведены в табл. 3.

Полученные данные показывают, что термическая стойкость углей связана с содержанием в них гетероатомов, прежде всего, кислорода и серы. Однако четкая корреляционная связь между указанными характеристиками не просматривается. Следовательно, выход парогазовых продуктов пиролиза определяется также характером связей гетероатомов в ОМУ.

Как видно из табл. 3, при полукоксовании восстановленных углей, обогащенных водородом, происходит более резкое обессеривание ОМУ. По-видимому, водород идет на восстановление сернистых соединений до сероводорода:

$$RSH \xrightarrow{[H]} RH + H_2S$$

В температурном интервале полукоксования возможно восстановление не только алифатических тиолов, дисульфидов, сульфидов, но также алициклических и ароматических серосодержащих соединений, включая тиофены.

Для молодых углей типа *в,* судя по изменению величины Н/С, характерна большая степень потери водорода и накопления углерода по сравнению с полукоксованием углей слабовосстановленного типа.

Спекающиеся угли средней стадии типа *в* теряют водород меньше, чем их изометаморфные пары типа *а*. Последние отличаются пониженной растворимостью в дихлорметане и показывают примерно в 1,8 раза меньшую степень конверсии в газообразные и жидкие продукты пиролиза. Отношение Н/С изменяется симбатно с величиной ΔH.

Полукоксование углей типа *в* приводит к более высокому выходу смолы, полукоксового газа, более низкому выходу полукокса по сравнению с результатами полукоксования их изометаморфных пар слабовосстановленного типа.

Эти результаты согласуются с выводами авторов [7] о том, что на средней стадии метаморфизма максимум спекаемости сопровождается максимальным увеличением растворимости в пиридине.

Отличия в характере ИК-спектров слабовосстановленных углей до и после термообработки прежде всего проявляются в увеличении отношения интенсивностей полос поглощения при 1700/2920 и 3050/2920 $см^{-1}$, что свидетельствует об увеличении прочности межмолекулярных взаимодействий и относительного содержания ароматических –СН-групп к алифатическим –СН-группам соответственно. Резкое увеличение относительной площади полос поглощения

Табл. 1. Характеристика исследуемых углей

№ п/п	Шахта, пласт, марка	Тип	R^o_m, %	Петрографический состав, об. %			Технический и элементный состав					
				Vt	L	I	W^a	A^d	V^{daf}	C^{daf}	H^{daf}	S^d_t
1	Челюскинцев, l_4, Д	*а*	0,71	87	8	5	0,8	2,4	35,6	79,3	4,94	2,17
2	Трудовская, l_4, Д	*а*	0,55	86	5	9	1,0	1,6	37,3	78.4	4,95	1,05
3	Гагарина, m_3, Ж	*а*	1,18	85	3	12	1,2	3,7	28,7	87,4	5,06	0,7
4	Засядько, l_4, Ж	*а*	1,01	89	6	5	1,4	2,6	31,6	87,8	5,16	1,09
1[1]	Украина, k_8, Д	*в*	0,57	83	6	11	1,5	9,9	41,8	77,9	5,30	2,87
2[1]	Трудовская, k_8, Д	*в*	0,49	80	8	12	0,9	4,6	46,2	76,1	5,43	5,85
3[1]	Гагарина, m_4, Ж	*в*	0,96	87	3	10	0,8	12,2	35,6	83,6	4,88	3,75
4[1]	Засядько, k_8, Ж	*в*	0,96	83	3	14	0,8	2,7	31,7	87,3	5,23	2,81

Примечание: обозначения в таблице приведены согласно ГОСТ 27313-95 (ИСО 1170:1977): R^o_m – показатель отражения витринита; Vt – витринит; L – липтинит; I – инертинит; W^a – влага аналитической пробы; A^d – зольность на сухое состояние; V^{daf} – выход летучих веществ на сухое беззольное состояние; C^{daf} – содержание углерода на сухое беззольное состояние; H^{daf} – содержание водорода на сухое беззольное состояние; S^d_t – содержание серы на сухое состояние.

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

Табл. 2. Характеристики исследуемых углей и полученных из них полукоксов

Выход продуктов полукоксования, %					Выход экстракта, μг/г C_o	Элементный состав углей и полученных из них полукоксов, %						Данные ИК-спектроскопии углей и полукоксов			
Полукокс	Вода	Смола	Газ	∑ см.+ +Г ПК	В	C^{daf} уголь/полукокс	H^{daf} уголь/полукокс	S^d_t уголь/полукокс	$(O+N)^{daf}$	N+S+O (%)	H/C	I_{3050}/I_{2920} уголь/полукокс	$S_{900\text{-}700}/S_{1600}$	I_{1250}/I_{1600} уголь/полукокс	I_{1700}/I_{2920} уголь/полукокс
63,5	13,6	6,7	16,2	36,5	10,8	79,3 / 87,81	4,94 / 3,61	2,17 / 1,4	11,8 / 7,19	15,8 / 8,58	0,75 / 0,49	0,9 / 1,24	0,48 / 5,39	0,56 / 0,82	0,76 / 0,94
64,8	17,5	9,0	8,7	35,2	10,54	78,4 / 88,83	4,95 / 3,19	1,05 / 1,03	15,8 / 7,01	16,7 / 7,98	0,76 / 0,43	0,92 / 1,07	0,49 / 4,87	0,61 / 0,72	0,78 / 0,97
84,4	2,3	5,3	8,0	15,6	1,88	87,4 / 91,6	5,1 / 3,55	0,7 / 0,68	5,4 / 4,69	7,5 / 4,85	0,69 / 0,46	0,2 / 0,31	0,89 / 1,16	0,3 / 0,34	0,04 / 0,13
82,7	3,2	5,9	8,2	17,3	2,08	87,8 / 92,1	5,16 / 3,04	1,09 / 1,02	5,1 / 4,89	7,04 / 4,86	0,71 / 0,4	0,21 / 1,07	0,82 / 1,19	0,26 / 0,38	0,04 / 0,34
62,5	11,3	12,9	13,3	37,5	13,54	77,9 / 86,78	5,3 / 3,67	2,87 / 2,4	12,5 / 7,14	16,8 / 9,55	0,82 / 0,51	0,8 / 1,1	0,7 / 7,41	0,66 / 0,91	0,63 / 1,11
62,1	10,7	14,3	12,9	37,9	15,77	76,1 / 85,28	5,43 / 3,36	5,85 / 2,9	13,7 / 8,44	18,5 / 11,36	0,86 / 0,47	0,93 / 1,08	0,58 / 6,19	0,61 / 0,85	0,8 / 1,04
71,8	1,0	4,7	22,5	28,2	2,43	83,6 / 89,0	4,9 / 3,69	3,75 / 2,71	8,4 / 5,39	11,5 / 7,31	0,7 / 0,5	0,15 / 0,19	1,15 / 1,59	0,25 / 0,19	0,03 / 0,11
71,7	1,5	6,1	20,7	28,3	2,94	87,3 / 90,0	5,23 / 3,57	2,81 / 2,28	6,0 / 5,63	7,47 / 6,43	0,71 / 0,48	0,2 / 0,61	0,96 / ,67	0,24 / 0,25	0,02 / 0,1

Примечание: обозначения в таблице приведены согласно ГОСТ 27313-95 (ИСО 1170:1977): H/C – атомное отношение водорода к углероду, ат., $(O+N)^{daf}$ – содержание кислорода и азота на сухое беззольное состояние; I_{3050}/I_{2920}, I_{1250}/I_{1600}, I_{1700}/I_{2920} – отношение интенсивности полос поглощения; $S_{900\text{-}700}/S_{1600}$ – отношение площадей полос поглощения.

Табл. 3. Изменение характеристик исследуемых углей в процессе полукоксования ($\Delta_{полукокс\text{-}уголь}$)

№ п/п	Выход продуктов полукоксования, %					Выход экстракта, μг/г C_o	Элементный состав углей и полученных из них полукоксов, %						Данные ИК-спектроскопии углей и полукоксов			
	Полукокс	Вода	Смола	Газ	∑см.+Г ПК	В	Δ C^{daf}	Δ H^{daf}	Δ S^d_t	Δ $(O+N)^{daf}$	Δ N+S+O	Δ H/C	Δ I_{1700}/I_{2920}	Δ I_{3050}/I_{2920}	Δ I_{1250}/I_{1600}	Δ $S_{900\text{-}700}/S_{1600}$
1	63,5	13,6	6,7	16,2	36,5	10,80	8,51	1,33	0,77	4,61	7,22	0,26	0,18	0,34	0,26	4,91
2	64,8	17,5	9,0	8,7	35,2	10,54	10,43	1,76	0,02	8,79	8,72	0,33	0,19	0,15	0,11	4,38
3	84,4	2,3	5,3	8	15,6	1,88	4,2	1,55	0,02	0,71	2,65	0,23	0,09	0,11	0,04	0,27
4	82,7	3,2	5,9	8,2	17,3	2,08	4,3	2,12	0,07	0,21	2,18	0,31	0,30	0,86	0,12	0,37
1’	62,5	11,3	12,9	13,3	37,5	13,54	8,88	1,63	0,47	5,36	7,25	0,31	0,48	0,3	0,25	6,71
2’	62,1	10,7	14,3	12,9	37,9	15,77	9,18	2,07	2,95	5,26	7,14	0,39	0,24	0,15	0,24	5,61
3’	71,8	1	4,7	22,5	28,2	2,43	5,4	1,21	1,04	3,01	4,19	0,20	0,07	0,04	-0,06	0,44
4’	71,7	1,5	6,1	20,7	28,3	2,94	2,7	1,66	0,53	0,37	1,04	0,23	0,08	0,41	0,01	0,71

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

ароматического водорода ($S_{900\text{-}700}$) к площади полос С=С-связей у полукоксов свидетельствует о процессах перераспределения водорода между продуктами полукоксования. Гидрирование промежуточных жидких продуктов способствует формированию пластической массы и улучшает спекаемость.

На средней стадии метаморфизма наблюдается уменьшение относительной интенсивности полос поглощения I_{1250}/I_{1600}, т.е. уменьшается плотность «сшивок» между макромолекулами, накапливается некоторое критическое количество полиароматических фрагментов, связанных в стопки за счет невалентных взаимодействий. Значение параметра I_{1250}/I_{1600} для всех образцов выше у полукоксов по сравнению с исходными углями. Следовательно, деструкция мостиковых эфирных групп в температурном интервале полукоксования практически не происходит. По-видимому, основными процессами в условиях низкотемпературного пиролиза являются процессы деалкилирования, приводящие к увеличению отношения I_{3050}/I_{2920} и увеличению прочности межмолекулярных взаимодействий (I_{1700}/I_{2920}). Кроме того, существенное влияние на прочность межмолекулярных взаимодействий и результаты пиролиза оказывает качественный и количественный состав кислород- и серосодержащих групп [8].

Исходя из представлений о том, что в процессе низкотемпературного пиролиза и растворения происходит разрушение межмолекулярных взаимодействий в структуре высокомолекулярных соединений, входящих в ОМУ, представлялось интересным проанализировать взаимосвязь этого параметра с выходом продуктов полукоксования. Прочность межмолекулярных взаимодействий оценивали по отношению интенсивностей полос поглощения I_{1700}/I_{2920}. Как следует из рис. 4, существует тесная корреляционная связь между прочностью межмолекулярных взаимодействий и выходом пирогенетической воды.

Выводы

Таким образом, результаты проведенного исследования показывают наличие тесной взаимосвязи между растворимостью углей, выходом продуктов низкотемпературного пиролиза, с одной стороны, прочностью межмолекулярных взаимодействий в ОМУ и процессами перераспределения водорода при термическом воздействии – с другой стороны.

Список литературы

1. Булат, А.Ф. Структура и взаимосвязь процессов комплексной переработки углеродсодержащих сред методом плазменной газификации / А.Ф. Булат, Л.Т. Холявченко, С.Л. Давыдов, В.И. Рудыка // Углехимический журнал. – 2014. – № 3. – С. 7-14.
2. Butuzova, L. Characterization of sulfur coal-derived liquids as a source of hydrocarbons to produce chemicals and synthetic fuels / L. Butuzova, V. Kulakova, J.M. Andrade, V. Shevkoplyas, O. Turchanina // Fuel. – 2016. – Vol. 184. – P. 314-324.
3. Butuzova, L. EPR and IR studies on the role of coal genetic type in plastic layer formation / L. Butuzova, R. Makovskyi, T. Budinova, S.P. Marinov // Fuel Processing Technology. – 2014. – Vol. 125. – P. 246-250.
4. Гюльмалиев, А.М. Теоретические основы химии угля / А.М. Гюльмалиев, Г.С. Головин, Т.Г. Гладун. – М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2003. – 556 с.
5. Butuzova, L. Possibility of the Implementation of the Principle of Sustainable Development in the Sphere of Coal Processing / L. Butuzova, O. Turchanina, Sh. Shakir, G. Butuzov, A. Bechtel, A. Castelbranco // China-USA Business Review. – 2013. – Vol. 12. – No. 11. – P. 1033-1243.
6. Взаимосвязь между технологическими свойствами углей и составом экстрактов / Л. Ф. Бутузова [и др.] // Вестник ДонНТУ. – 2016. – №1(1). – С. 13–20.
7. Русьянова, Н.Д. Углехимия. – М.: Наука, 2000. – 316 с.
8. Грязнов, Н.С. Пластическое состояние и спекание углей. – Свердловск: Металлургиздат, 1962. – 191 с.

L.F. Butuzova /Dr.Sci. (Chem.)/, V.A. Kolbasa, G.N. Butuzov /Cand.Sci. (Chem.)/
Donetsk National Technical University (Donetsk)
V.N. Shevkoplyas /Cand.Sci. (Chem.)/
Institute of Physical-Organic Chemistry and Coal Chemistry (Donetsk)

STRUCTURAL INDICATORS FOR ASSESSING FEASIBILITY OF THE COAL PROCESSING BY METHOD OF SEMI-COKING

Background. *Semi-coke is the solid product of pyrolysis. By its physical and thermal properties is a high-quality fuel suitable for efficient combustion in power units, gasification, etc. The objective of*

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org

this paper is to assess the changes in the elemental and functional composition of the organic mass of coals in the process of semi-coking and to establish the relationship between these changes and the yield of pyrolysis products as well as products soluble in organic solvents.

***Materials and/or methods**. For the realization of the task, a set of thermal and physic-chemical methods of research used. Semi-coking carried out by the classical method in the Fischer retort – the method to determine the output of products of semi-coking (GOST 3168-93, ISO 647-74). Elemental and technical analysis of samples made according to GOST 12113-94, GOST 27314-91, GOST 11022-95. IR-spectra of coal and semi-coke registered on the Bruker FTS-7 spectrometer using DRIFT technique at the Institute of Organic Chemistry with the Center of Phytochemistry of the Bulgarian Academy of Sciences. Coals for analysis prepared in the form of a 5 % aqueous mixture with potassium bromide. IR-spectra of samples were taken in the region of wave numbers* γ*=4000-400* cm^{-1}*. Correction of baseline done using the Origin computer program. Correlation defined using Microsoft Excel 2016. Coals extracted with dichloromethane at a temperature of 75 °C and a pressure of 50 bar [3]. Pairs of restored and poorly restored Donetsk coal basin coals of the low and medium stage of metamorphism used as study objects.*

***Results.** Studies have shown that there is a close relationship between the solubility of coal, the yield of low-temperature pyrolysis products, on the one hand, the strength of intermolecular interactions in the organic mass of coal and the processes of hydrogen redistribution under thermal action – on the other hand.*

***Conclusion.** In the paper, the presence of correlation between the structural-group, elemental composition of solid fuels, their solubility in organic solvents and behavior during thermal processing established.*

***Keywords:** coal, pyrolysis, structure, the correlation coefficient, the disproportionation of hydrogen.*

Сведения об авторах

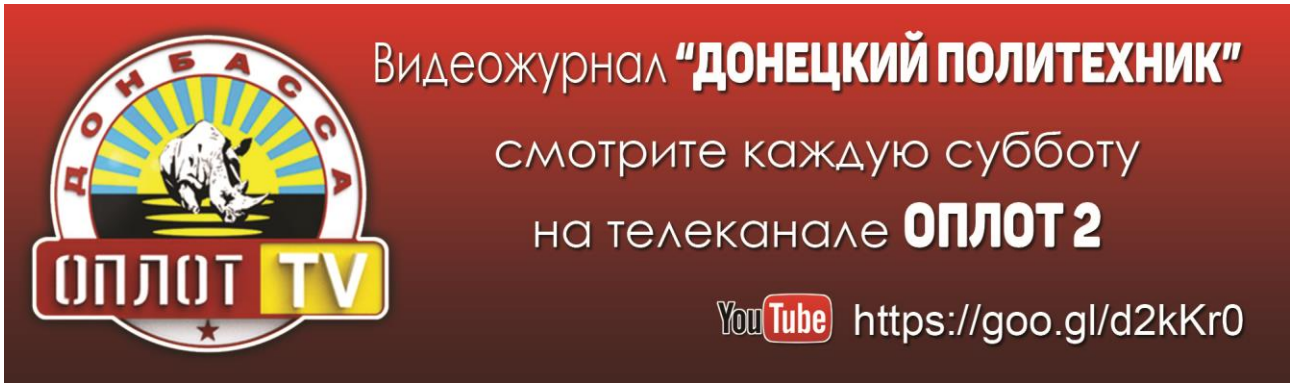
Л.Ф. Бутузова
SPIN-код: 7391-2663
Author ID: 7004736806
ORCID iD: 0000-0002-4232-3057
Телефон: +380 (50) 921-38-51
Эл. почта: ludmila.lfb@yandex.ru

Г.Н. Бутузов
SPIN-код: 4448-4394
Author ID: 8701390000
Телефон: +380 (50) 589-74-89
Эл. почта: ludmila.lfb@yandex.ru

В.А. Колбаса
SPIN-код: 4466-7867
Телефон: +380 (95) 059-55-32
Эл. почта: vikula.ka@mail.ru

В.Н. Шевкопляс
Author ID: 6603169954
Телефон: +380 (95) 633-03-15
Эл. почта: v-shevkoplyas@ukr.net

Статья поступила 09.01.2018 г.
© Л.Ф. Бутузова, В.А. Колбаса, Г.Н. Бутузов, В.Н. Шевкопляс, 2018
Рецензент к.т.н., доц. И.Г. Дедовец



ТРЕБОВАНИЯ К СТАТЬЯМ, НАПРАВЛЯЕМЫМ В РЕДАКЦИЮ

1. Основной текст статьи должен содержать такие необходимые элементы, выделенные заголовками, как:

– **постановка проблемы** в обобщенном виде и ее связь с важными научными или практическими задачами;

– **анализ последних исследований и публикаций**, в которых начато решение данной проблемы и на которые опираются авторы, выделение нерешенных ранее частей общей проблемы, которым посвящена данная статья;

– формулировка **цели (задачи) исследования;**

– изложение **основного материала исследования** с полным обоснованием полученных научных результатов;

– **выводы** по данному исследованию и перспективы дальнейшего развития данного направления.

2. Статья, основной текст вместе с рисунками и др. нетекстовыми элементами, должна быть объемом **8…10 полных** страниц формата А4 (210×297 мм) с полями **20** мм с каждой стороны. Рукопись статьи необходимо оформлять с помощью редактора MS Word. Шрифт – Times New Roman, **12** пт, стиль – обычный. Межстрочный интервал – одинарный. Расстановка переносов – автоматическая. Выравнивание – по ширине страницы. Страницы не нумеровать.

3. Структура статьи (каждый элемент с новой строки): код УДК; инициалы и фамилии авторов с указанием ученой степени каждого (количество авторов **не более 3-х** от одной организации); название организации, город, где работают авторы; название статьи; аннотация на русском языке (объемом **не более 300** символов); ключевые слова (**от 3 до 5**); основной текст статьи; список литературы. Сокращение слов в тексте, рисунках и таблицах не допускается.

В аннотации на русском языке сжато излагается формулировка задачи, которая решена в статье, и приводятся полученные основные результаты.

В конце статьи, после списка литературы приводятся инициалы и фамилии авторов, ученые степени, организации, города, название статьи, аннотация и ключевые слова на английском языке

Аннотация на английском языке должна представлять собой резюме, призванное выполнять функцию независимого от статьи источника информации. Резюме должно быть информативным (не содержать общих слов), оригинальным (не являться калькой аннотации на других языках), содержательным (отражать основное содержание статьи и результаты исследований), структурированным (следовать логике описания результатов в статье), компактным, но не коротким (объемом **от 250 до 300** слов). Типичная структура резюме: состояние вопроса (**Background**); материалы и/или методы исследования (**Materials and/or methods**); результаты (**Results**); заключение (**Conclusion**).

Внимание! Убедительная просьба не разбивать текст на колонки, как это сделано в журнале, т.к. это усложняет редакторскую обработку статьи!

4. **Обязательным условием** является наличие в статье графического материала (рисунков, графиков, схем, фотографий), размером **не менее 80×80** мм, в формате *.tif или *.jpg, разрешением **не менее 300** dpi. Графический материал внедренными объектами размещается по тексту после первого упоминания, не разрывая текста абзаца. Все позиции, обозначенные на рисунках, должны быть объяснены в тексте. Под каждым рисунком указывается его порядковый номер и название (выравнивание по центру страницы, без точки в конце). Рисунки должны иметь один интервал (пустую строку) сверху и снизу.

Внимание! Запрещается внедрять графические материалы в виде объектов, связанных с др. программами, например, с КОМПАС, MS Excel и т.п. Рисунки, выполненные непосредственно в MS Word не принимаются.

5. Математические формулы необходимо выполнять с помощью редактора формул **MS Equation Editor 3.0** в соответствии со следующими размерами: обычный символ – **11** пт; крупный индекс – **7** пт; мелкий индекс – **5** пт; крупный символ – **13** пт; мелкий символ – **8** пт.

Все величины, входящие в формулы, должны быть объяснены в тексте. Формулы должны иметь один интервал (пустую строку) сверху и снизу. Формулы выполняются курсивом, **кроме цифр и символов греческого алфавита**. Формулы нумеруются (справа в круглых скобках, не отступая от формулы) **только в том случае**, если в тексте на них имеются ссылки.

Внимание! Количество формул в статье **не более 5**. Запрещается выполнять формулы с помощью MathCAD или др. аналогичных программ.

6. Таблицы должны иметь порядковый номер и название (выравнивание по центру страницы, без точки в конце) и располагаться по тексту после первого упоминания, не разрывая текста абзаца. Таблицы должны иметь один интервал (пустую строку) сверху и снизу.

7. **Обязательным условием** является наличие в статье списка литературы, который приводится после выводов через один интервал (пустую строку) под заголовком **Список литературы**. Перечень ссылок должен быть составлен в порядке упоминания в тексте. Ссылки на литературу по тексту заключаются в квадратные скобки. В списке литературы должно быть **не менее 3-х** публикаций, вышедших **за последние 5** лет, а также **не менее 3-х** зарубежных (англоязычных) публикаций.

Для принятия решения о публикации статьи в журнале, в адрес редакции необходимо выслать:

– сопроводительное письмо (с указанием, что статья ранее нигде не публиковалась) от организации, где работают авторы и сведения об авторах статьи;

– электронный вариант статьи (имя файла составляется из фамилий авторов, например, ИвановПетров.doc) и сведений об авторах (имя файла – ИвановПетров_sved.doc).

В сведениях об авторах для каждого соавтора обязательно должен быть указан адрес персональной эл. почты.

Для ускорения подготовки очередных номеров журнала, просьба передавать сопроводительное письмо в отсканированном виде, электронный вариант статьи и сведения об авторах по эл. почте на адрес: **vestnikdonntu@gmail.com**

Внимание! Убедительная просьба, проверить получение редакцией материалов любым из способов (по телефонам **+380 (66) 176-72-65, +380 (62) 301-07-89** или эл. почте).

Редакция оставляет за собой право возвращать статьи авторам на доработку в следующих случаях: статья небрежно оформлена и не соответствует требованиям редакции журнала, приведенным выше; статья требует доработки в соответствии с замечаниями рецензента и редакторов; отсутствует сопроводительное письмо от организации, где работают авторы или сведения об авторах.

Требования к рекламно-информационным материалам, публикация которых оплачивается, согласовываются непосредственно с редакцией журнала.

ISSN 2518-1653 (online). Интернет: vestnik.donntu.org