

## Блок защиты от электрического пробоя автоматизированной системы управления процессами высокочастотной электротермии полимеров

А.В. Лившиц

Иркутский государственный университет путей сообщения, Чернышевского 15, Иркутск, Россия  
livnet@list.ru

Статья поступила 12.03.2014, принята 17.05.2014

*В статье приведены результаты исследований одной из проблем высокочастотной электротермии – защиты оборудования, материала и приспособлений от электрического пробоя. Рассмотрены сопровождающие развитие пробоя частичные разряды и динамика их появления как очень чувствительная характеристика предпробойного состояния полимеров в процессе ВЧ-воздействия. На основе экспериментального исследования предпробойного состояния широкого спектра материалов различной толщины построена имитационная модель развития пробоя и определены критерии управления процессом высокочастотной обработки с целью его защиты от пробоя, представлена блок-схема алгоритма такого управления. С использованием методов математической статистики найдено, что с 95-процентной надежностью факт начала развития электрического состояния можно контролировать по трем частичным разрядам в заданном ранее временном интервале. Отмечена необходимость учета инерционности систем обратной связи. Найденные решения позволили построить автоматизированные системы управления высокочастотной обработкой полимеров с получением значительного годового экономического эффекта.*

**Ключевые слова:** высокочастотная электротермия, частичные разряды, система управления, электрический пробой, защитный контур.

## Electric breakdown security block for automated control system of high-frequency electrothermics processes of polymers

A. V. Livshits

Irkutsk State Transport University, 15 Chernishevsky St., Irkutsk, Russia  
livnet@list.ru

Received 12.03.2014, accepted 17.05.2014

*The article describes some research results concerning such a problem of high-frequency electrothermics as electric breakdown security of equipment, material and devices. Partial discharges, accompanied electrical breakdown development, and dynamics of their formation as a very sensitive characteristic of electric pre-breakdown of polymers during high-frequency action have been considered in the article. On the basis of experimental studies of electric pre-breakdown state of a wide range of materials with different thicknesses a simulation model of electric breakdown development has been constructed and the process control criteria for high-frequency processing have been defined for electric breakdown security. A diagram of electric breakdown security block has been shown as an algorithm of the control. Due to the use of the mathematical statistics methods, it has been found that the beginning of the electric breakdown development can be controlled by three partial discharges in the time period previously given with reliability equals 95%. The author noted the necessity of taking into account the inertia of feedback systems. The solutions presented have made it possible to construct automated control systems of polymer high-frequency processing with obtaining significant annual economic effect.*

**Keywords:** high-frequency electrothermics, partial discharges, control system, electric breakdown, protective circuit.

**Введение.** За последние десятилетия в ряде отраслей промышленности все большее применение стали находить полимерные материалы. Коррозионная стойкость, малое водопоглощение, высокая удельная прочность, антимагнитные свойства и технологичность позволяют использовать эти материалы взамен цветных металлов, нержавеющей стали и других конструкционных материалов. В качестве яркого примера подобной замены можно привести использование полиамидных сепараторов

подшипников буксовых узлов железнодорожного подвижного состава вместо металлических. При этом возрастающий объем и ассортимент производства деталей из полимеров требует дальнейшего совершенствования существующих технологических процессов их обработки. В настоящее время к наиболее прогрессивным способам изготовления деталей следует отнести ресурсо- и энергосберегающие технологии, связанные с обработкой полимерных материалов токами высокой частоты (ВЧ). В отличие от

традиционных технологий с внешним подводом тепла, такими, как конвекционное, тепловое излучение, электротермия обладает целым рядом преимуществ: избирательность воздействия; быстрый прогрев материала в объеме вне зависимости от его геометрических размеров, формы; безынерционность нагрева; отсутствие контакта обрабатываемого материала с теплоносителем; возможность концентрации высоких энергий в больших объемах. При этом реализация процессов электротермии, и особенно построение автоматизированных систем управления ВЧ-обработкой, встречает ряд проблем, связанных с формированием алгоритмов управления.

**Постановка задачи.** Одна из таких проблем заключается в опасности развития пробойных явлений. Пробой приводит к значительным материальным потерям (прогар образца и дорогостоящих электродов) в случае его неконтролируемого проявления. Результаты критического воздействия пробоя показаны на рис. 1. Контроль состояния обрабатываемых полимерных материалов, несомненно, должен предусматривать возможность контроля за процессом развития этого явления.

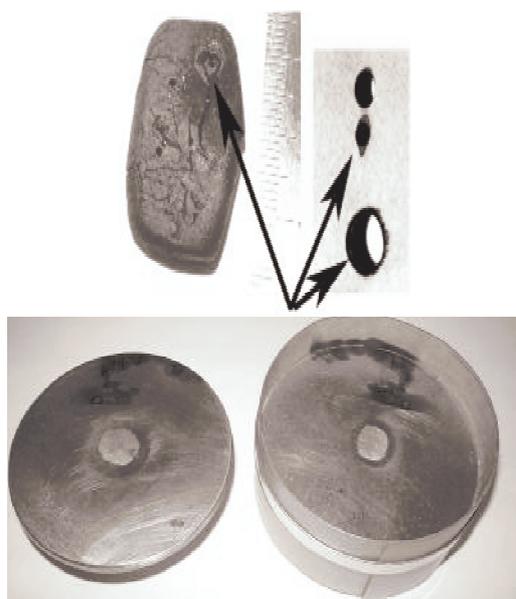


Рис. 1. Результат воздействия пробойных явлений

Незначительное изменение напряжения (около 10 %), происходящее при пробое, отследить весьма сложно, тем более что время пробоя может составлять  $10^{-6} \dots 10^{-8}$  с [1]. Из этого можно сделать вывод, что контроль ВЧ-процесса по вольтамперометрическим показателям не позволяет производить измерения с достаточной степенью надежности в момент возникновения пробойных явлений.

**Поиск путей решения.** Решение задачи контроля предпробойного состояния было найдено в ходе экспериментальных исследований. При проведении натуральных испытаний были отмечены возникающие незначительные разряды, которые изначально были идентифицированы как пробой. Ряд дендритных образований на поверхностях диэлектрических материалов (рис. 2) и их исследование на

диэлектрическую прочность мегомметром, не подтвердили наличие шунтирующих пробойных каналов.



Рис. 2. Дендритные образования на поверхности диэлектрического материала

Это дало возможность предположить, что данные разряды относятся к т. н. частичным разрядам (ЧР). Частичные разряды проявляются в виде искровых явлений в различных частях обрабатываемого материала. Литературный обзор показал, что ЧР возникают в микропорах, пустотах, трещинах и расслоениях, которые появляются в процессе хранения и эксплуатации полимерных материалов. Повторное помещение этих же материалов в ВЧ-поле подтвердило отсутствие электрического пробоя. Более того, вторичное испытание образцов показало, что начальная активность ЧР по сравнению с первой обработкой снизилась практически до нуля. Исходя из этого, было выдвинуто предположение, что в процессе воздействия ЧР происходит «улучшение» поверхностной структуры материала за счет выгорания включений, неоднородностей и воздушных микрокамер.

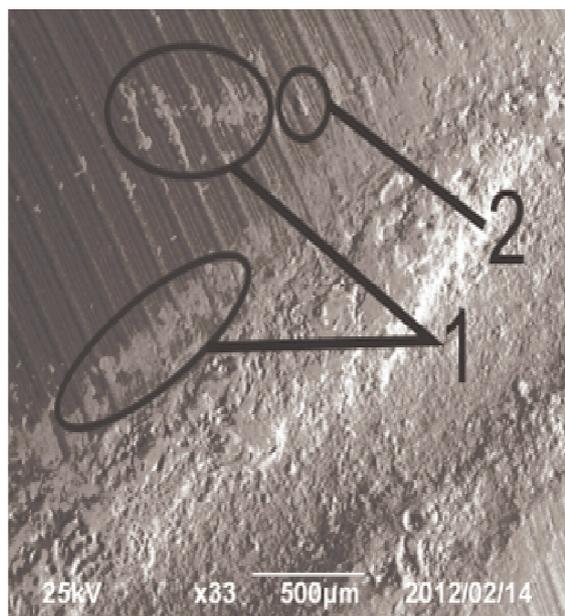


Рис. 3. Следы воздействия ЧР

Аналогичный эффект достигается существующими технологическими операциями по обработке полимерных материалов коронными разрядами (являющимися частным случаем ЧР). Проведя дополнительные исследования, было определено, что ЧР являются очень чувствительной характеристикой предпробойного состояния полимеров в процессе ВЧ-воздействия. Измерение импульсов ЧР позволяет с высокой достоверностью выявлять механизмы развития пробоя на самых ранних стадиях его возникновения [1...4].

Само появление и развитие частичных разрядов неоднозначно и требует применительно к электротермии дополнительных исследований. Подтверждает это проведенное исследование структуры поверхности обработанного

стеклонаполненного полиамида, подвергнутого воздействию частичных разрядов. На фотографии, полученной с помощью электронного микроскопа (рис. 3) видны результаты воздействия частичных разрядов, улучшающих поверхностный слой полимерного материала за счет выгорания концентраторов напряжения и включений (поз. 1 и 2 соответственно).

**Решение задачи контроля развития предпробойного состояния.** Учитывая сложность поставленной задачи, ее решение видится в составлении имитационной математической модели развития пробойного состояния и формирования алгоритмов функционирования защитного контура по пробую.

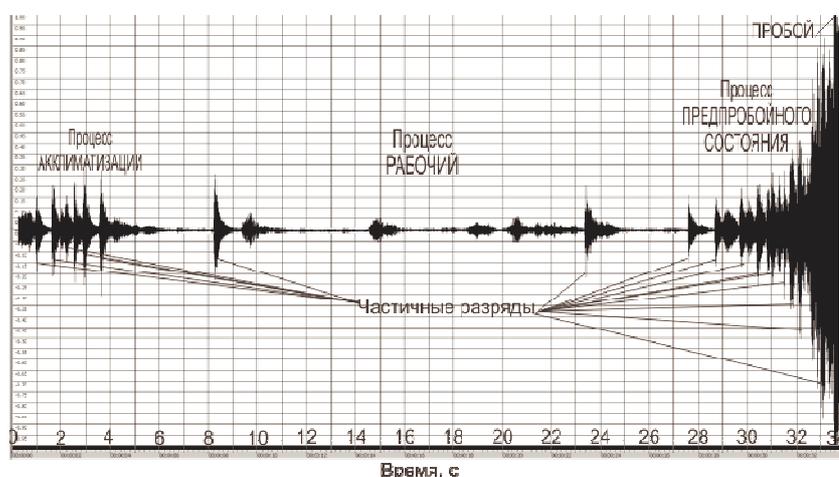


Рис. 4. Фонограмма динамики частичных разрядов

Анализ фонограммы позволяет выделить группы частичных разрядов, соответствующие:

- этапу приработки, улучшения поверхности (далее – этап акклиматизации),
- рабочему процессу нагрева,
- предпробойному состоянию с последующим пробоем.

По графическому изображению количества возникающих частичных разрядов  $n_{\text{чр}}$ , в зависимости от времени обработки  $\tau$ , представленных на рис. 5, можно заметить, что участки кривых начала предпробойного состояния, характеризующие зависимость между временем возникновения ЧР и количеством ЧР, имеют показательный вид.

Используя автоматизированную систему научных исследований, представленную в работе [5], была проведена серия экспериментальных исследований предпробойных состояний широкого спектра материалов. Полученные зависимости представлены на рис. 6.

По результатам анализа кривых распределения ЧР можно сделать вывод об экспоненциальном развитии событий и условно разделить материалы на две группы:

- с активным развитием предпробойного состояния после первого разряда ЧР<sub>1</sub>, когда выполняется следующее условие:

$$\Delta\tau_{\text{чр}1} = \tau_{\text{чр}2} - \tau_{\text{чр}1} < 1,2 \text{ с}, \quad (1)$$

где  $\tau_{\text{чр}1}$ ,  $\tau_{\text{чр}2}$  – время возникновения первого и второго частичного разрядов соответственно;

- с длительным предпробойным состоянием (время от первого до последующего ЧР более 2 с):

$$\Delta\tau_{\text{чр}1} = \tau_{\text{чр}2} - \tau_{\text{чр}1} > 2 \text{ с}. \quad (2)$$

Предположив, что  $n$ -ый ЧР, для которого:

$$\Delta\tau_{\text{чр}n} > 1,2 \text{ с} \quad (3)$$

не является началом развития предпробойного состояния, получаем следующее семейство графиков динамики развития пробоя различных материалов, представленное на рис. 7.

Рассмотрев совокупность приведенных графиков возникновения ЧР, можно выделить кривую, соответствующую минимальной скорости развития предпробойного состояния, максимально отстоящую от других по межразрядным временным показателям (КДЧР). Проведя исследование ее графического отображения и аппроксимацию методом наименьших квадратов, определено, что данная кривая подчинена функциональной зависимости имеющей следующий вид:

$$Y = \exp (A + BX) , \quad (4)$$

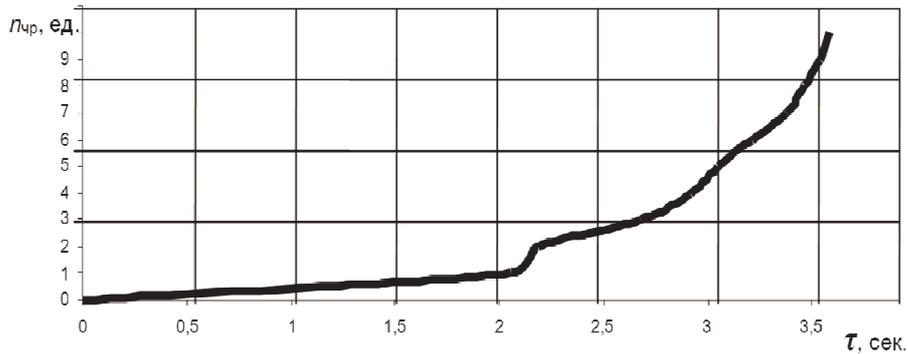


Рис. 5. Динамика частичных разрядов предпробойного состояния

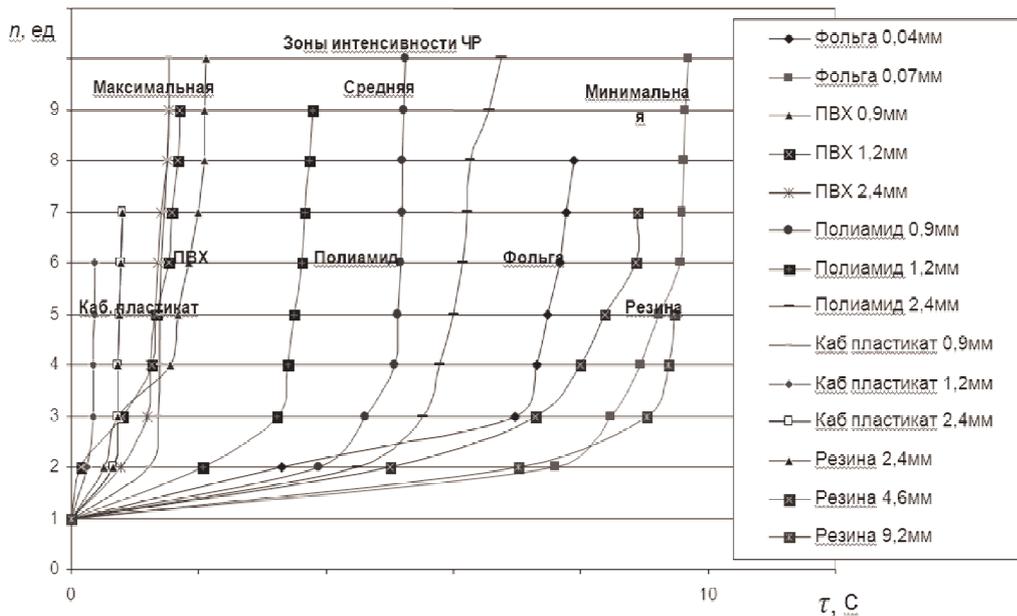


Рис. 6. Зависимость возникновения ЧР от времени обработки

или в нашем случае:

$$n_{чр} = \exp (A + B\tau_{чр\ расч}) \text{ или } \tau_{чр\ расч} = \frac{\ln n_{чр} - A}{B}, \quad (5)$$

где  $A = -1,99$ ,  $B = 1,8$  с достоверностью аппроксимации  $R^2 = 0,98$ .

Таким образом, можно считать, что математическая зависимость, описывающая возникновение предпробойного состояния, соответствует материалам со значительными отличиями по физико-химическим показателям и геометрическим размерам (толщине) при принятии за начало развития предпробойного состояния факта появления ЧР, при котором выполняется зависимость (3). При этом появляется возможность по определенной в ходе исследования математической модели вида (5) произвести расчет возникновения события ЧР. Что, в свою очередь, позволяет в реальном режиме времени найти алгоритм управления процессом ВЧ-воздействия с целью предотвращения пробоя. Все это было использовано для организации контроля и управления процессом ВЧ-обработки полимерных материалов с максимальной энергоэффективностью (работа в режиме

предпробойного состояния) и при этом с защитой от самого пробоя [5].

Используя методы математической статистики было найдено, что с 95-процентной надежностью факт начала развития предпробойного состояния можно контролировать по  $n_{чр} = 3$  в заданном ранее временном интервале. Необходимо отметить, что при определении алгоритма управления процессом ВЧ-обработки в области защиты от пробоя необходимо учитывать инерционность систем обратной связи. При контроле по третьему ЧР  $k_{дчр} = 3$  время реагирования может составлять менее 0,1 с. В этом случае момент принятия решения может быть понижен до второго ЧР  $k_{дчр} = 2$  со значительным увеличением временем реагирования. Это несколько ухудшит энергоэффективность метода ВЧ-обработки, но зато повысит надежность системы управления.

В работах [5...8] представлены блок-схемы алгоритмов управления процессами электротермии, составной частью которых является защитный контур предотвращения электрического пробоя, в основе которого лежит контроль динамики возникновения частичных разрядов (рис. 8).

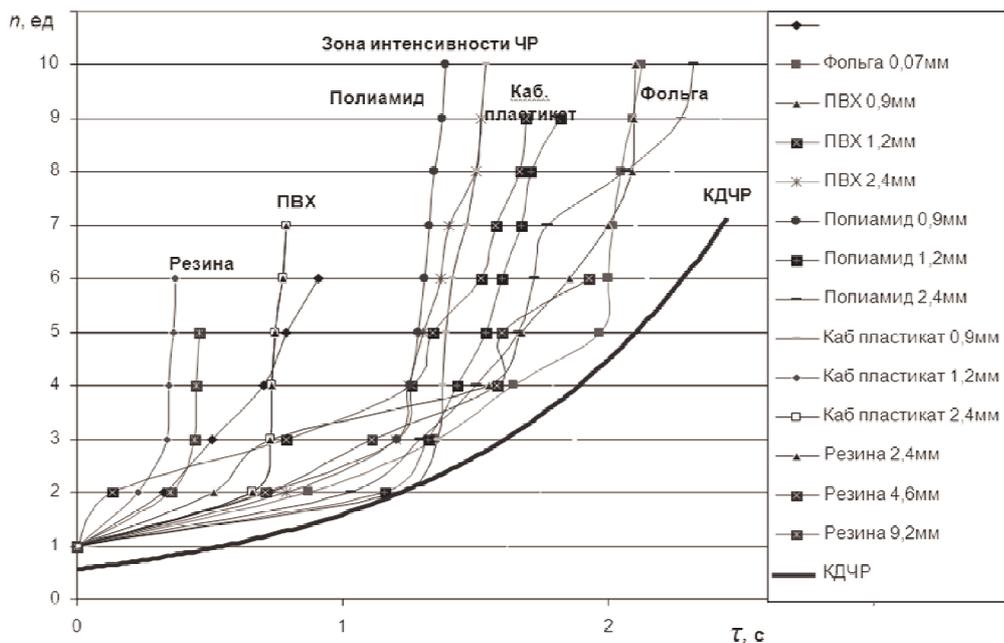


Рис. 7. Кривая динамики частичных разрядов (КДЧР)

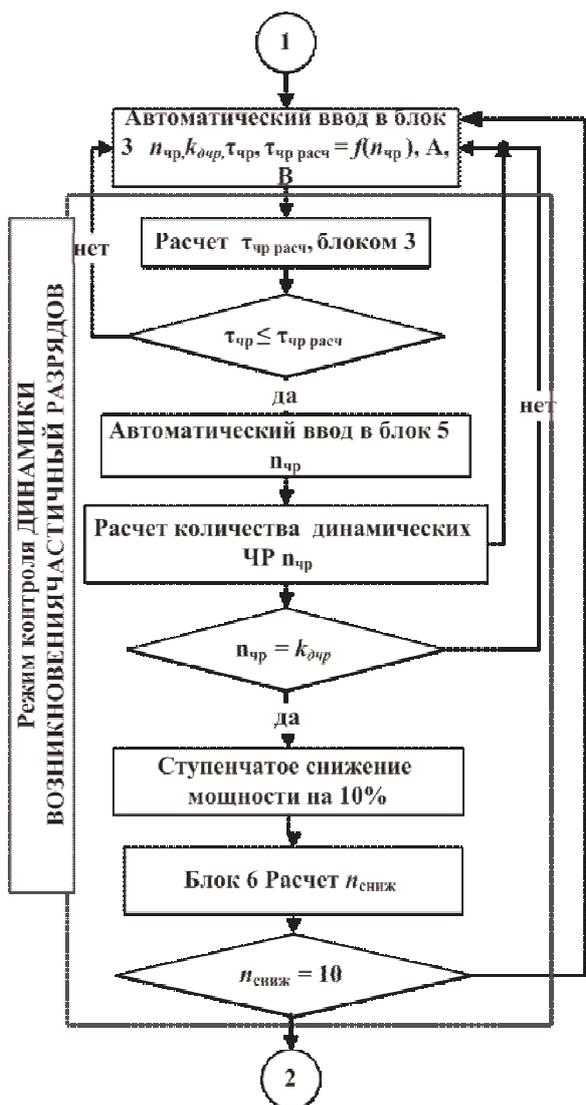


Рис. 8. Блок-схема защитного контура по динамике ЧР

В случае возникновения ЧР блок 3 производит расчет времени возникновения событий частичных разрядов:

$$\tau_{чр\ расч} = f(n_{чр}), \quad (6)$$

сравнивает время  $\tau_{чр}$  с расчетным временем возникновения ЧР. Если:

$$\tau_{чр} \leq \tau_{чр\ расч}, \quad (7)$$

то это значит, что идет процесс развития предпробойного состояния. Выполнение условия (7) приводит к ступенчатому (10 %) уменьшению мощности ВЧ-воздействия.

$$n_{чр} = k_{дчр}, \quad (8)$$

где:  $k_{дчр}$  – численное значение последовательно возникших динамических ЧР.

В случае, если уменьшение мощности не приводит к стабилизации процесса возникновения ЧР, отключение режима «НАГРЕВ» будет произведено автоматически при выполнении условия:

$$n_{сниж} = 10, \quad (9)$$

где:  $n_{сниж}$  – количество событий ступенчатого снижения мощности.

### Заключение

Таким образом, созданная имитационная модель развития предпробойного состояния процесса высокочастотной электротермии позволила определить критерии управления процессом и решить проблему построения автоматизированных систем управления высокочастотной обработки полимеров промышленного использования с получением значительного годового экономического эффекта на установку (более 900 тыс. руб.) [5] за счет устранения

проблем выхода из строя приспособлений, прожога

Также приведенные результаты научных исследований позволили использовать процессы высокочастотной электротермии в качестве технологии восстановления эксплуатационных свойств полиамидных сепараторов буксовых узлов железнодорожного подвижного состава (госбюджетная тема «Технологии восстановления полиамидных сепараторов полем высокой частоты. Автоматизация ВЧ-установки», зарегистрирована ФГНУ «Центр информационных технологий и систем органов исполнительной власти», рег. № 01201177497 от 10.01.2011 г.)

### *Литература*

1. Косяков А.А., Бунзя А.А. Диагностика изоляции устройств электроснабжения железных дорог по характеристикам частичных разрядов при плановых периодических высоковольтных испытаниях // Молодые ученые – транспорту: сб. науч. тр. Екатеринбург: УрГУПС, 2005. Т. 2. С. 37-42.
2. Kosakov A.A. Partial Discharges Research in Power Supplying Devices of Railway Transport // Prace Naukowe. 2004. Transport NR 2 (20). P. 275-280.
3. Сухогозов А.П., Косяков А.А. Исследование частичных разрядов в изоляции электрических машин // Вестн. УГТУ–УПИ. 2003. Ч. 1, № 5 (25). С. 363-371.
4. Косяков А.А. Устройство контроля порогового уровня частичных разрядов: пат. 2266548 Рос. Федерации. опубли. 20.12.05, Бюл. № 35. 14 с.
5. Попов С.И. Автоматизация управления технологическими процессами восстановления эксплуатационных свойств полимеров: дис. ... канд. техн. наук. Иркутск, 2013.
6. Филиппенко Н.Г. Автоматизация управления процессом высокочастотной обработки полимерных материалов: дис. ... канд. техн. наук. Иркутск, 2012.
7. Лившиц А.В., Попов С.И., Ларченко А.Г., Филиппенко Н.Г. Разработка автоматизированной системы управления процессом ВЧ-обработки полимерных материалов с защитой от пробойных явлений // Научное издание. Информационные системы контроля и управления в промышленности на транспорте. Иркутск: ИрГУПС, 2013. С. 163-172.

материала.

8. Лившиц А.В., Филиппенко Н.Г., Каргапольцев С. К. Система управления и блок устройства автоматизации высокочастотной обработки полимерных материалов [Электронный ресурс] // Материалы международной научно-практической конференции «Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании 2011»: докл. междунар. конф. URL: <http://www.sworld.com.ua /index.php/ru/transportation-411/maintenance-and-repair-of-transportation-411/11637-411-0277> (дата обращения: 1.10.11).

### *References*

1. Kosyakov A. A., Bunza A. A. isolation Diagnostics of equipment supply rail by characteristics of partial discharges in the planned periodic high-voltage tests // Young-Dyje scientists transport: Sat. nach. Works. volume 2. Ekaterinburg, Urgups. 2005. S. 37-42.
2. Kosakov A. A. Partial Discharges Research in Power Supplying Devices of Railway Transport // Prace Naukowe. 2004. Transport NR 2 (20). S. 275-280.
3. Sukhugozova A. P., Kosyakov A. A. Study of partial discharges in the insulation of electrical machines // Vestnik UGTU-UPI. 2003. №5(25), part 1. S. 363-371.
4. RU patent № 2266548, IPC G01R 31/12, the control Device threshold level of partial discharges. Kosyakov A. A. Published 20.12.2005 BI №35. 14 s.
5. Popov S. I. Automation control of technological processes of recovery of operational properties of polymers. Diss... candidate of technical Sciences. Irkutsk. 2013.
6. Filippenko, N. G. Automation process control high-frequency processing of polymeric materials. Diss... candidate of technical Sciences. Irkutsk. 2012.
7. Livshits A. A., Popov S. I., Larchenko A. G., Filippenko N. G. Development of automated process control system HF-processing of polymer materials with protection from the breakdown phenomena // Scientific publication. Information system of monitoring and control in industry, on transport. Irkutsk: Irkutsk State University Of Communications. 2013. Pp.163-172.
8. Livshits A. A. Filippenko N. G., Kargapol'tsev S. K. Management system and block devices of automation of high-frequency processing of polymeric materials [Electronic resource] // Proceedings of international scientific-practical conference "Modern problems and ways of their solving in science, transport, production and education 2011": Dokl. The Intern. Conf. Mode of access: <http://www.sworld.com.ua /index.php/EN /transportation-411/maintenance-and-repair-of-transportation-411/11637-411-0277> (date treatment of: October 2011) - room CIT 411 – 0277.