

## IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

На рис. 1 приведена расчетная зависимость низшей теплоты сгорания от значения величины золowego остатка для твердого топлива – Камышанский, Талдинский, Экибастузские угли.

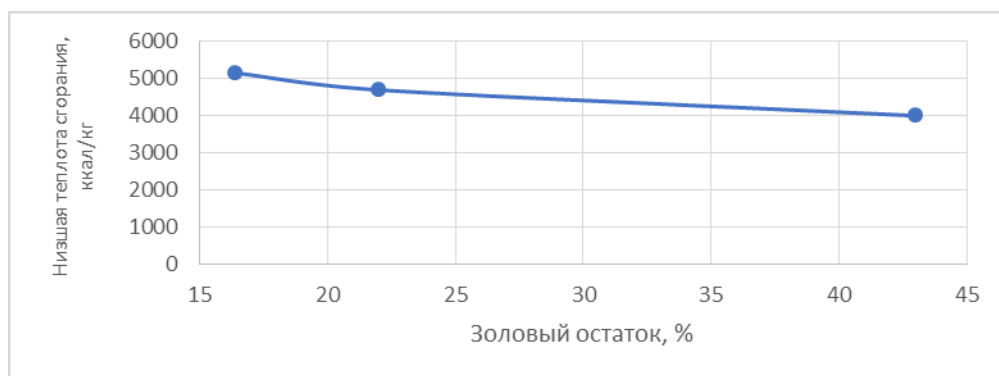


Рис. 1. Зависимость низшей теплоты сгорания от золowego остатка

## V. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

При проведении расчетных исследований установлено, что с увеличением негорючей части (золowego остатка  $A$ ) наблюдается уменьшение низшей теплоты сгорания топлива  $Q_{\text{н}}$ , в связи с уменьшением суммарного значения горючей части и летучих веществ.

## VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С увеличением негорючей части уменьшается значение низшей теплоты сгорания, что в целом влияет на эффективность работы энергетической установки.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лариков Н. Н. Теплотехника: учеб. для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1985. 432 с.
2. Липов Ю. М., Третьяков Ю. М. Котельные установки и парогенераторы. Москва-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2005. 592 с.
3. Вербовецкий Э. Х., Жмерик Н. Г. Методические указания по проектированию топочных устройств энергетических котлов. СПб: НПО, ЦКТИ, 1996. 270 с.
4. Слободина Е. Н., Михайлов А. Г., Новикова Э. Э., Теребилов С. В. Численное моделирование процессов теплопереноса при турбулентном горении газового топлива в топочном объеме // Омский научный вестник. 2016. №2 (146). С. 66–68.
5. ГОСТ 25543-2013. Угли бурые, каменные и антрациты. Классификация по генетическим и технологическим параметрам. Введ. 2015. 01.01. М.: Изд-во стандартов, 2015. 20 с.
6. ГОСТ 32356-2013. Угли каменные и антрациты окисленные Кузнецкого и Горловского бассейнов. Классификация. Введ. 2015-01-01. М.: Изд-во стандартов, 2014. 7 с.

УДК 621.374

### РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОГО УСТРОЙСТВА ОЧИСТКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ОТ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

А. С. Татевосян, А. А. Татевосян, В. Е. Аникин, Г. О. Белявский, Б. В. Чижма  
Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

**Аннотация.** Предложена методика построения многоконтурной схемы замещения электроимпульсного устройства, предназначенного для очистки технологических поверхностей от налипания сыпучих материалов. При построении схемы замещения используется метод затухания постоянного тока в электрической цепи дисковой катушки с якорем, в качестве которого используется пластина из дюралюминия.

ния. Расчет затухания постоянного тока в катушке с якорем рассматривается в пакете ELCUT как задача нестационарного магнитного поля с присоединенной электрической цепью. Варьируя расстояние между дисковой катушкой и якорем при расчете нестационарного магнитного поля, временная зависимость тока в катушке раскладывается на сумму двух экспонент. Экспоненциальные составляющие тока в катушке позволяют записать операторное сопротивление электрической цепи, а затем рассчитать сопротивления участков многоконтурной схемы замещения дисковой катушки с якорем в зависимости от расстояния между ними. Многоконтурная схема замещения электроимпульсного устройства очистки является основой построения математической модели для исследования переходного процесса, сопровождающегося высоковольтным разрядом конденсаторной батареи на катушку индуктора и исследования ударной волны в стенках технологического оборудования при их очистке от сыпучих материалов.

*Ключевые слова:* электроимпульсная очистка; катушка индуктора с якорем; электропроводная поверхность объекта воздействия, многоконтурная схема замещения.

DOI: 10.25206/2310-4597-2019-1-105-109

## I. ВВЕДЕНИЕ

В электроимпульсных устройствах импульсы силы возникают в результате взаимодействия вихревых токов, индуцированных в якоре (токопроводящей пластине), с мощными импульсами магнитного поля, созданного током большой плотности при высоковольтном электрическом разряде емкостного накопителя энергии (конденсаторной батареи) на катушку индуктора [1, 2]. Длительность процесса аккумуляции энергии, а затем ее выделение в чрезвычайно малые промежутки времени позволяет получить максимально возможные величины механического импульсного воздействия на очищаемую поверхность объекта воздействия. Исполнительным элементом в электроимпульсном устройстве является катушка индуктора с якорем, изготовленным из дюралюминиевой пластины. Индуктор катушки с якорем плотно прижимаются к стенке технологического оборудования с внешней стороны.

## II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Эффективность работы электроимпульсных устройств очистки зависит от многих факторов, а именно: амплитуды и формы импульса электромагнитной силы, числа точек приложения силы, частоты воздействия. На оптимизацию режимов работы электроимпульсных устройств очистки оказывают влияние геометрические размеры исполнительных устройств очистки, обмоточные данные свойства токопроводящего материала для изготовления якоря, технологический зазор между катушкой индуктора и якорем.

Моделирование таких процессов возможно только при расчете нестационарного магнитного поля электроимпульсного устройства очистки с присоединенной электрической цепью, например с использованием профессиональной версии комплекса программ ELCUT 6.0. Однако этот путь сопровождается чрезмерно большими затратами машинного времени, что существенно усложняет решение вопросов оптимизации параметров электроимпульсного устройства очистки, вследствие перебора большого количества вариантов геометрии исполнительного элемента и обмоточных данных катушки индуктора. Поэтому возникает потребность воспользоваться хорошо разработанным аппаратом теории электрических цепей, а именно построением многоконтурной схемы замещения электроимпульсного устройства очистки на основе расчета затухания постоянного тока в катушке индуктора с якорем [3, 4].

## III. МОДЕЛИРОВАНИЕ

При моделировании нестационарного магнитного поля исполнительного элемента очистки в комплексе программ ELCUT изменялась величина технологического зазора между катушкой индуктора и якорем, изменяющемся в диапазоне от 0,5 до 5 мм с шагом 1 мм. Толщина токопроводящей пластины, изготовленной из дюралюминия, принималась в расчете 3 мм. При построении геометрии модели исполнительного элемента было учтено, что катушка индуктора является бескаркасной, намотана медным проводом сечением  $2,0 \times 5,1 \text{ мм}^2$  и содержит при варьировании вариантов задачи 15, 20 и 25 витков. При решении задачи в пакете ELCUT принимается интегрирование по времени переходного процесса 0,6 мс, шаг интегрирования 0,01 мс, время запоминания решения на шаге, равном шагу интегрирования. Емкость конденсатора равна 100 мкФ. Анализ результатов расчета нестационарного магнитного поля при затухании постоянного тока в электрической цепи индуктора с якорем позволяет получить параметры многоконтурной схемы замещения электроимпульсного устройства очистки, показанной на рис. 1.

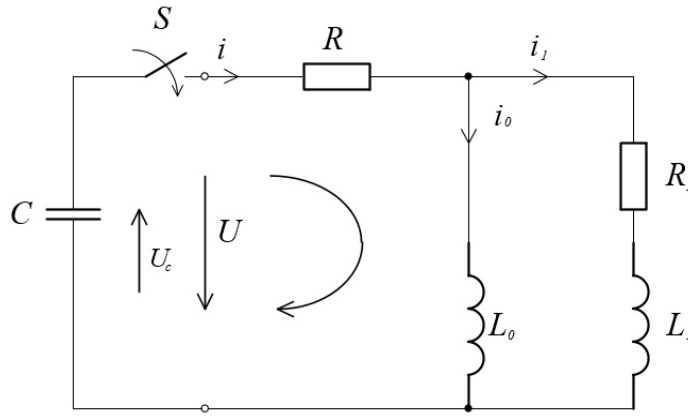


Рис. 1. Многоконтурная схема замещения электроимпульсного устройства очистки

Для того чтобы сократить время расчета оптимальных параметров импульса конденсатора и напряжения питания, необходимо решить систему уравнений:

$$\begin{cases} iR + \frac{d\psi_0}{dt} + U_c = 0 \\ iR + i_1 R_1 + \frac{d\psi_1}{dt} + U_c = 0 \\ i = i_0 + i_1 \end{cases}$$

где  $R$  – токоограничивающее сопротивление конденсатора;  $i_0, i_1, R$  определяются по затуханию постоянного тока, и их параметры зависят от зазора между индуктором и пластиной.

Полная система уравнений для анализа переходного процесса при высоковольтном разряде конденсаторной батареи на катушку индуктора с якорем имеет вид:

$$\begin{aligned} iR + L_0(\delta) \frac{\partial i_0}{\partial t} + i \frac{\partial L_0(\delta)}{\partial \delta} * V + U_c &= 0 \\ iR + i_1 R_1 + L_1(\delta) \frac{\partial i_1}{\partial t} + i_1 \frac{\partial L_1}{\partial \delta} * V + U_c &= 0 \\ i &= i_0 + i_1; \\ \frac{\partial V}{\partial t} &= \frac{1}{m} [F_{ЭМ} - F_{сопр}]. \end{aligned}$$

Здесь обозначено  $F_{Э}$ ,  $F_{сопр}$  – соответственно электромагнитная сила и сила сопротивления стенки технологического оборудования, подверженная очистке от сыпучих материалов.

Ток в конденсаторе

$$i = C \frac{\partial U_c}{\partial t} = i_0 + i_1;$$

Полная система уравнений электроимпульсного устройства очистки в форме Коши принимает вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial U_c}{\partial t} &= \frac{1}{C} (i_0 + i_1); \\ \frac{\partial i_0}{\partial t} &= \frac{1}{L_0(\delta)} [-U_c - i_0 \frac{\partial L_0(\delta)}{\partial \delta} * V - R(i_0 + i_1)] = 0 \\ \frac{\partial i_1}{\partial t} &= \frac{1}{L_1(\delta)} [-U_c - i_1 R_1 - i_1 \frac{\partial L_1}{\partial \delta} * V - R(i_0 + i_1)] = 0 \\ \frac{\partial V}{\partial t} &= \frac{1}{m_{\text{я}}} [F_{ЭМ} - F_{сопр}] \\ \frac{\partial \delta}{\partial t} &= V. \end{aligned}$$

Решение системы уравнений производится при нулевых начальных условиях для токов в ветвях схемы и скорости якоря, начальном значении зазора между катушкой индуктора и якорем  $\delta = \delta_{\text{нач}}$ .

Напряжение на конденсаторной батарее в момент коммутации соответствует напряжению высоковольтного источника питания  $U_c(0) = U_0$ .

Электромагнитная сила, действующая на стенку технологического оборудования, определяется по изменению запаса энергии магнитного поля в магнитной системе от расстояния между катушкой индуктора и якорем:

$$F_{\text{эм}} = \frac{\partial W_{\text{эм}}}{\partial \delta};$$

Энергия, запасенная в системе индуктор-токопроводящая пластина (якорь) определяется по формуле.

$$W_{\text{эм}} = L_0(\delta) \frac{i_0^2}{2} + L_1(\delta) \frac{i_1^2}{2}.$$

Тогда электромагнитная сила будет

$$F_m = \frac{1}{2} i_0^2 \frac{\partial L_0}{\partial \delta} + \frac{1}{2} i_1^2 \frac{\partial L_1}{\partial \delta}$$

Решением системы уравнений являются законы изменения токов в ветвях многоконтурной схемы замещения  $i_0(t)$ ,  $i_1(t)$ ,  $i(t)$ , электромагнитная сила  $F_{\text{эм}}(t)$ , зазор  $\delta(t)$ , скорость якоря  $V(t)$

#### IV. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Расчетные кривые, определяющие зависимость параметров для схемы замещения исполнительного элемента очистки от величины зазора между катушкой индуктора и якорем, показаны на рис. 4.

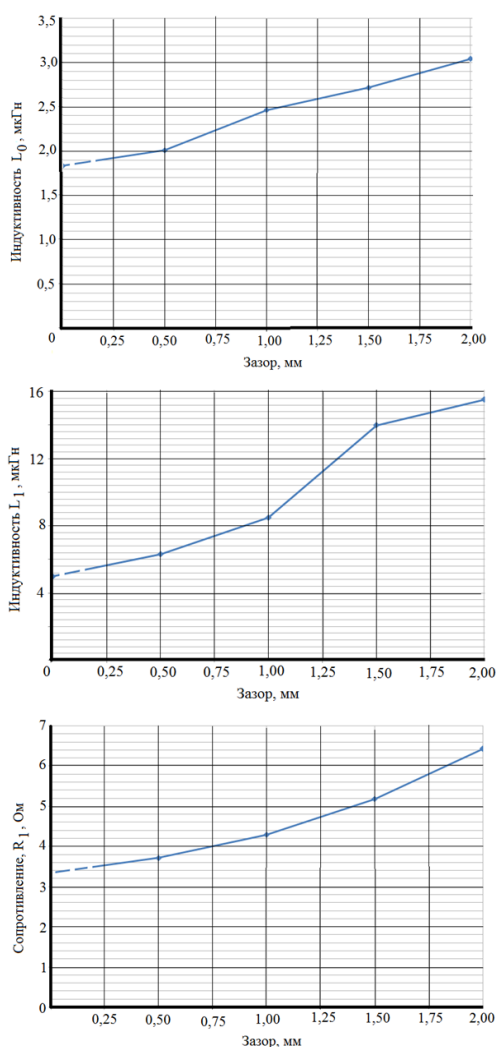


Рис. 4. Параметры схемы замещения электроимпульсного устройства очистки в функции от величины зазора между катушкой индуктора и якорем

## V. ВЫВОДЫ

Предложен метод расчета динамических процессов в электроимпульсном устройстве, основанный на синтезе многоконтурной схемы замещения, параметры которой определяются в комплексе программ Elcut при решении задачи расчета нестационарного магнитного поля с присоединенной электрической цепью.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шильников П. Ю., Захаренко В. А. Электроимпульсная очистка поверхностей // Россия молодая: передовые технологии – в промышленность. 2013. № 1. С. 254–255.
2. Виноградов В. В., Зыкова Ю. А., Самохвалов Н. М. Методика расчета щелевого фильтра // Известия Томского политехнического университета. 2015. Т. 326, № 11. С. 67–73.
3. Татевосян А. С., Татевосян А. А., Захарова Н. В., Лукачева А. А. Определение параметров схемы замещения электроимпульсного устройства очистки поверхности от загрязнения // Динамика систем, механизмов и машин. 2018. Т. 6, № 3 С. 102–108. DOI: 10.25206/2310-9793-2018-6-3-102-108
4. Татевосян А. С., Чижма Б. В., Аникин В. Е., Белявский Г.О. Исследование влияния конструктивных параметров исполнительных элементов на работу электроимпульсных устройств очистки // Актуальные вопросы энергетики. 2018. С. 294–298.

УДК 621.314.261

# МЕТОДИКА ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ПОГРУЖНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С ИНТЕГРАЛЬНЫМ ПРЕОБРАЗОВАНИЕМ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАТУХАНИЯ ТОКА СТАТОРА

Р. Н. Хамитов<sup>1</sup>, В. В. Аникин<sup>2</sup><sup>1</sup>Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия<sup>2</sup>Нижевартовский государственный университет, г. Нижневартовск, Россия

**Аннотация.** Надежное и энергосберегающее частотное управление погружными асинхронными электродвигателями требует исследование его работы в составе электротехнических комплексов установок электроцентробежных насосов на базе моделирования. Данный подход ориентирован на разработку методов идентификации параметров его схем замещения по экспериментальным данным. Целью исследования являлась разработка методики для определения параметров Т-образной схемы замещения погружных асинхронных электродвигателей с использованием интеграла кривой затухания тока обмотки статора без дополнительного перехода к частотным характеристикам. Исследование методики проводилось на базе разработанной установки для идентификации параметров схем замещения погружных асинхронных электродвигателей. Для оценки достоверности методики идентификации параметров схемы замещения погружного электродвигателя с интегральным преобразованием кривой затухания тока статора погружного электродвигателя был проведен эксперимент, показавший наибольшее расхождение между значениями параметров схемы замещения – не более 12 %. Разработанная методика идентификации параметров схем замещения погружного электродвигателя, таким образом, позволяет определять эксплуатационные параметры и характеристики электродвигателя.

**Ключевые слова:** погружной асинхронный электродвигатель, схема замещения, переходная характеристика, интеграл кривой затухания тока, схема включения.

DOI: 10.25206/2310-4597-2019-1-109-113

## I. ВВЕДЕНИЕ

Необходимость в предэксплуатационной идентификации параметров схем замещения погружного электродвигателя (ПЭД) возникает при частотном и векторном регулировании скорости вращения и электромагнитного момента ПЭД для организации надежных и оптимальных режимов эксплуатации в составе электротехнических комплексов (ЭТК) установок электроцентробежных насосов (УЭЦН) [1].

Методы идентификации, связанные с вращением ПЭД на поверхности, требуют для своей реализации использования совместимого с конструкцией ПЭД оборудования, заменяющего реальную нагрузку на валу в виде УЭЦН, либо наличия дорогостоящих специализированных стендов для прямо-сдаточных испытаний, которые