

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОММУТАЦИОННЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ С УЧЕТОМ ПОВТОРНЫХ ЗАЖИГАНИЙ ДУГИ В МЕЖКОНТАКТНОМ ПРОМЕЖУТКЕ ВАКУУМНОГО ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ

Выполнено математическое моделирование перенапряжений, возникающих при отключении двигателя, в зависимости от начальных условий коммутации.

Ключевые слова: моделирование, коммутационные перенапряжения, вакуумный выключатель, зажигание дуги.

V.S. Kulikovsky, O.A. Kovaleva

THE MODELING OF THE SWITCHING OVERVOLTAGE TAKING INTO ACCOUNT THE ARC RE-IGNITIONS IN THE INTER-CONTACT GAP OF THE VACUUM SWITCH

The mathematical modeling of the overvoltage occurring in the engine turning off, depending on the switching initial conditions is carried out.

Key words: modeling, switching overvoltage, vacuum switch, arc ignition.

Введение. Устойчивая работа электроприемников промышленных предприятий зависит от многочисленных факторов, одним из которых является надежность высоковольтной коммутационной аппаратуры. Опыт эксплуатации показал, что данному критерию наиболее соответствуют вакуумные выключатели (ВК), что привело к их широкому внедрению. В то же время после внедрения ВК прошел рост аварийности высоковольтных электродвигателей. Основной причиной выхода электродвигателей из строя явился пробой их изоляции коммутационными перенапряжениями. Поэтому важной задачей является определение опасных уровней напряжений.

Наиболее широкие возможности в исследовании коммутационных перенапряжений дает математическое моделирование. Авторами была предложена модель возникновения перенапряжений без учета повторных зажиганий дуги [1].

Цель работы. Показать влияние повторных зажиганий дуги на величину уровней перенапряжений и длительность протекания переходного процесса при коммутации нагрузки.

Основные задачи: предложить для исследования влияния повторных зажиганий дуги в межконтактном промежутке выключателя математическую модель процесса отключения нагрузки; использование результатов моделирования при разработке устройств ограничения коммутационных перенапряжений.

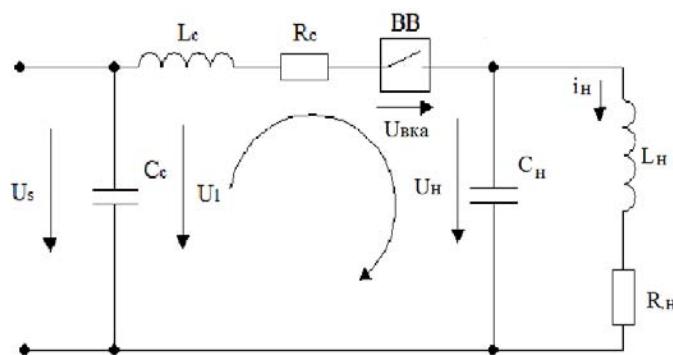


Рис.1. Схема замещения участка электрической сети «распределительный пункт – кабель – вакуумный выключатель – кабель – двигатель»

Для дальнейшего моделирования предлагается однофазная схема замещения участка электрической цепи «распределительный пункт – вакуумный выключатель – кабель – электродвигатель».

Обозначения в схеме: C_c – емкость кабеля относительно земли от РП до вакуумного выключателя; C_h – емкость отключаемого участка сети; L_c и L_h – индуктивности кабеля первого участка и нагрузки; R_h – активное сопротивление нагрузки; R_c – активное сопротивление кабеля от распределительного пункта до вакуумного выключателя; ВВ – вакуумный выключатель; U_s – напряжение сети; U_{mp} – напряжение в межконтактном промежутке выключателя; U_h – напряжение отключаемого контура.

В реальных же условиях в межконтактном промежутке высоковольтного выключателя при коммутации силовой нагрузки возникают многократные повторные зажигания дуги. Если переходное напряжение превышает электрическую прочность в межконтактном промежутке вакуумной дугогасительной камеры выключателя, то возникает пробой промежутка

$$U_{np}(t) = k \times t + C, \quad (1)$$

где k – константа, определяющая рост электрической прочности в вакуумной дугогасительной камере;

C – первоначальная прочность промежутка после погасания дуги, величина которой зависит от контактного материала, скорости расхождения контактов, типа коммутационного аппарата.

В период горения дуги происходит уравновешивание зарядов емкостей нагрузки и сети, что приводит к возникновению высокочастотного тока, протекающего по контуру « $C_c - R_c - L_c - C_h$ » (рис. 2). Частота колебаний тока вследствие незначительной величины индуктивности L_c (порядка нескольких сотен мкГн) может достигать 100–150 кГц. Одновременно с этим через дугу в контур нагрузки начинает протекать ток промышленной частоты. В выключателе происходит наложение этих токов, что может привести к появлению нулевых значений результирующего тока. Высокая отключающая способность вакуумного выключателя позволяет ему отключать токи со значительной скоростью изменения тока. Отключение происходит, если скорость не превышает 500 А/мкс. Величина емкостей C_c , C_h такова, что ток i_{2cb} не проникает в контуры нагрузки и источника питания.

Для схемы на рисунке 2 записываем уравнение, описывающее физические процессы в контуре протекания высокочастотного тока

$$L_c \times \left(\frac{di_2}{dt} \right) + R_c \times i_{2cb} + u_h - u_1 = 0. \quad (2)$$

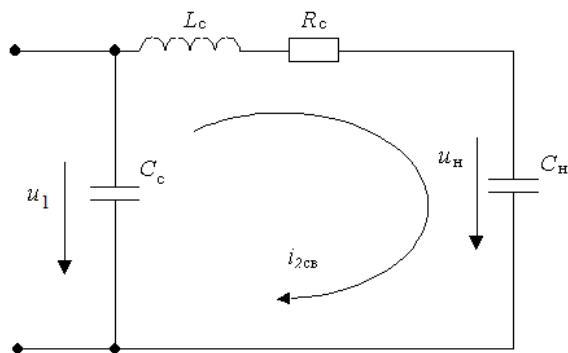


Рис. 2. Контур протекания высокочастотного тока

Решениями уравнения (2) относительно тока и напряжения на нагрузке будут следующие уравнения:

$$i_{2cb}(t) = \left(u_1 - u_h - L_c \times I_m \cos(\varphi_1 - \varphi) - \frac{\alpha_1 \times B_2 \times L_2 \times \sin(\omega_{B1} t) + (-I_m) \times \sin(\psi_1 - \varphi)}{L_c \times \omega_{e1}} \right). \quad (3)$$

$$i_h(t) = i_{1np}(t) + i'_{1cb}(t) = I_m \sin(\omega_e t + \psi_{11} + \varphi) e^{\alpha t} \times [G_1 \sin(\omega_e t) + G_2 \cos(\omega_e t)], \quad (4)$$

$$u_{H,nep}(t) = U_m \sin(\omega t + \psi_{11}) + e^{\alpha_1 t} \times \left\{ \left(\frac{-i_{1c8}(0) + \omega \times U_m \cos(\psi_{11}) \times C_H - S_2 \times \alpha_1 \times C_\partial}{\omega_{61} \times C_H} \right) \sin(\omega_{61} t) + u_{H,c8} \cos(\omega_{61} t) \right\}, \quad (5)$$

где $\alpha_1 = -\frac{R_c}{2 \times L_c}$ – коэффициент затухания;

$\omega = \sqrt{\left(\frac{R_c}{2 \times L_c} \right)^2 - \left(\frac{C_\partial - C_c}{L_c \times C_\partial \times C_c} \right)}$ – частота свободных колебаний;

$$B_1 = \frac{u_1 - u_H - L_c \times I_m \times \omega \times \cos(\psi_{11} - \varphi) - \alpha \times B_2 \times L_c}{L_c \times \omega_{61}};$$

$$B_2 = -I_m \times \sin(\psi_{11} - \varphi);$$

$$G_1 = \frac{u_H - R \times i_{1nep} - L_H \times I_m \times \omega \times \cos(\psi_{11} + \varphi) - \alpha_2 \times L_H \times G_2}{L_H \times \omega_6};$$

$G_2 = e^{\alpha t_{n3}} \times (C_1 \times \sin(\omega_6 t_{n3}) + C_2 \times \cos(\omega_6 t_{n3})) - I_m \times \sin(\psi_{11} + \varphi)$ – постоянные интегрирования тока;

$$S_1 = -\frac{i_{1c8} - \omega \times U_m \times \cos(\psi_{11}) \times C_H - S_2 \times \alpha_1 \times C_H}{\omega_{61} \times C_H};$$

$S_2 = u_{H,c8}$ – постоянные интегрирования напряжения.

Выражения (3)–(5) позволяют провести математическое моделирование перенапряжений при отключении вакуумными выключателями вращающейся электрической машины.

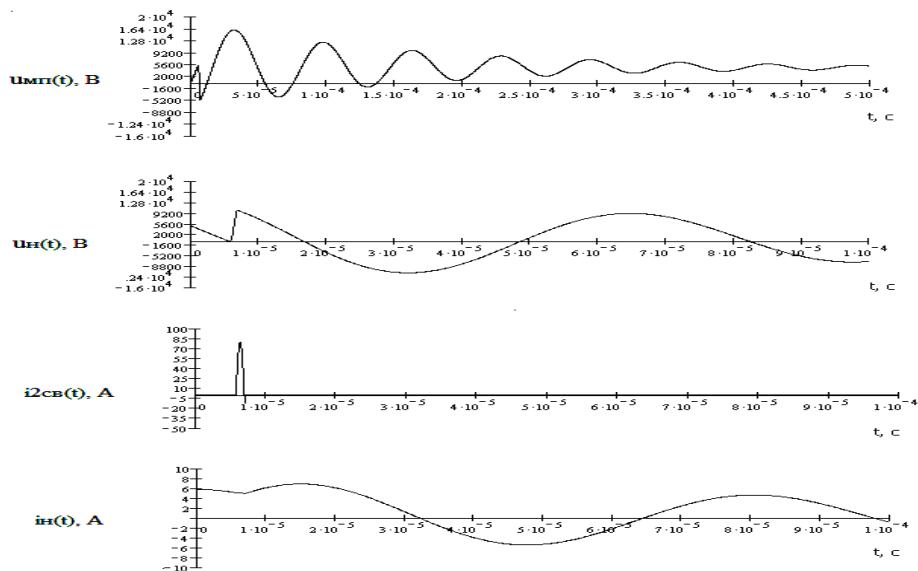


Рис. 3. Отключение электродвигателя СДЭ-14-29 на холостом ходу: длина кабельной вставки 0 м; величина тока среза 5,66 А; u_{mp} – восстанавливющееся напряжение в межконтактном промежутке; u_H – восстанавливющееся напряжение на зажимах электродвигателя; i_{2c8} – высокочастотный ток, протекающий через ВКА; i_H – ток, протекающий в фазе электродвигателя

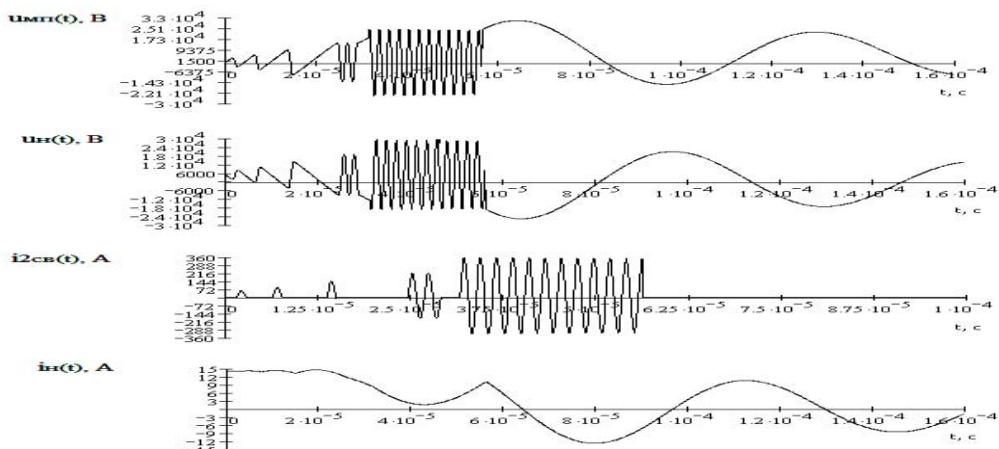


Рис. 4. Отключение электродвигателя СДЭ-14-29 на холостом ходу: длина кабельной вставки 0 м; величина тока среза 14 А; u_{mp} – восстанавливющееся напряжение в межконтактном промежутке; u_H – восстанавливющееся напряжение на зажимах электродвигателя; i_{2cb} – высокочастотный ток, протекающий через ВКА; i_H – ток, протекающий в фазе электродвигателя

На рисунках 3 и 4 приведены результаты моделирования перенапряжений при отключении синхронного двигателя СДЭ-14-29 мощностью 520 кВт, присоединенного непосредственно к вакуумному выключателю (длина кабельной вставки $L_{\text{каб}}=0$).

После того как произошел срез тока (5,66 А) на спаде положительной синусоиды тока нагрузки, возникают свободные затухающие колебания электромагнитной энергии с частотой $f = 15,3$ кГц. Через 5,7 мкс. И в вакуумной дугогасящей камере происходит пробой промежутка. Вследствие этого в контуре « $C_c - R_c - L_c - C_H$ » происходит уравновешивание потенциалов емкостей. Это приводит к появлению переходного тока $i_{2\text{per}}$ с частотой колебаний 458 кГц. Максимальная амплитуда напряжения на зажимах двигателя 10,7 кВ, скорость роста напряжения составляет 188 В/мкс.

При увеличении амплитудного значения тока среза до 14 А изменяется картина переходного процесса (рис.4). После погасания дуги частота колебания электромагнитной энергии достигает $f = 15,3$ кГц. Через 1,4 мкс после начала переходного процесса происходит превышение напряжения в межконтактном промежутке над уровнем восстанавливющейся электрической прочности дугогасительной камеры, что в итоге приводит к обратному зажиганию дуги и возникновению в контуре « C_c, C_H, L_c, R_c » (см. рис.2) высокочастотного тока $i_{2\text{cb}}$. Через 2,7 мкс значение тока $i_{2\text{per}}$ будет равно 0 А, в этот момент происходит повторное отключение цепи. Максимальная амплитуда напряжения на нагрузке в этот момент времени равна 30 кВ.

Процесс продолжается до тех пор, пока восстанавливющаяся электрическая прочность не превысит максимальное напряжение в межконтактном промежутке выключателя. Всего получено пять повторных зажиганий дуги. Общая продолжительность процесса многократных повторных зажиганий дуги составила 52,9 мкс.

В таблице приведены амплитуды перенапряжений без и с учетом повторных зажиганий дуги.

Мощность двигателя, кВт	520	
Ток среза, А	5,66	14
Амплитуда восстанавливующегося напряжения U_H , кВ	9*/10.7	21*/30

* Значение без учета повторных зажиганий дуги [2].

Предложенная математическая модель переходного процесса при коммутации электродвигателей позволяет сделать следующий вывод.

Выводы. При учете повторных зажиганий дуги в межконтактном промежутке выключателя происходит увеличение амплитуды и фронта волны ожидаемого напряжения. Возрастает длительность переходного процесса, а следовательно, и продолжительность негативного воздействия на изоляцию электроприемника.

При определенных сочетаниях начальных условий коммутации двигателя возможна эскалация перенапряжений.

Результаты моделирования могут быть использованы для определения параметров и выбора устройств защиты от перенапряжений с учетом срока эксплуатации электроприемников.

Литература

1. Вакуумные выключатели в схемах управления электродвигателями / В.А. Воздвиженский, А.Ф. Гончаров, А.В. Козлов [и др.]. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 200 с.
2. Куликовский В.С., Ковалева О.А. Моделирование коммутационных перенапряжений при коммутации высоковольтных электродвигателей вакуумными выключателями // Вестник КрасГАУ. – 2012. – № 5 – С. 337–343.



УДК 631.348.2

Д.О. Суринский, В.Н. Агапов,
Н.И. Смолин, А.В. Козлов

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ РАЗРАБОТКИ ЭЛЕКТРОДЕРАТИЗАТОРА

Предложенная авторами методика расчета позволяет теоретически обосновать основные конструктивные и технологические параметры электродератизатора для эффективной защиты объектов АПК от грызунов.

Ключевые слова: электродератизатор, конструктивные и технологические параметры, грызуны, электрический ток.

D.O. Surinsky, V.N. Agarov,
N.I. Smolin, A.V. Kozlov

THEORETICAL PREREQUISITES OF THE ELECTRIC DISINFESTATION DEVICE DEVELOPMENT

The proposed by the authors calculation methodology allows to theoretically substantiate the main structural and technological parameters of the electric disinfestation device for the effective protection of AIC objects from rodents.

Key words: electric disinfestation device, structural and technological parameters, rodents, electric current.

Введение. В биофизических исследованиях наибольшее применение как раздражитель получил электрический ток. Широкое использование электрического тока определяется его свойствами. Электрический ток легко получить. Он точно дозируется по амплитуде и длительности, являясь адекватным раздражителем, не вызывающим после себя морфологических изменений. Его действие ограничивается временем включения источника тока, т.е. электрический ток не имеет по-