

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВИБРАЦИИ КОНТАКТОВ

С.П. Лохов, В.В. Варганов

В настоящее время научились делать такие качественные силовые реле, что они составили конкуренцию тиристорам и транзисторам в преобразователях средней мощности до 20 кВА. Так авторы статьи успешно применяют их в стабилизаторах переменного напряжения 220 В с переключениями отпаек автотрансформатора указанной мощности. Увы, в этих современных реле контакты по-прежнему вибрируют (дребезжат), что подтверждают экспериментальные осциллограммы на рис. 1. Поэтому для нас актуальной стала промежуточная задача, по возможности, простого моделирования этой вибрации для последующего использования ее в моделях всего преобразователя. Она разбивается на две задачи моделирования механической вибрации контактов и моделирования электрической искры (дуги) при этом. Без критики известных решений приступим к описанию нашего решения.

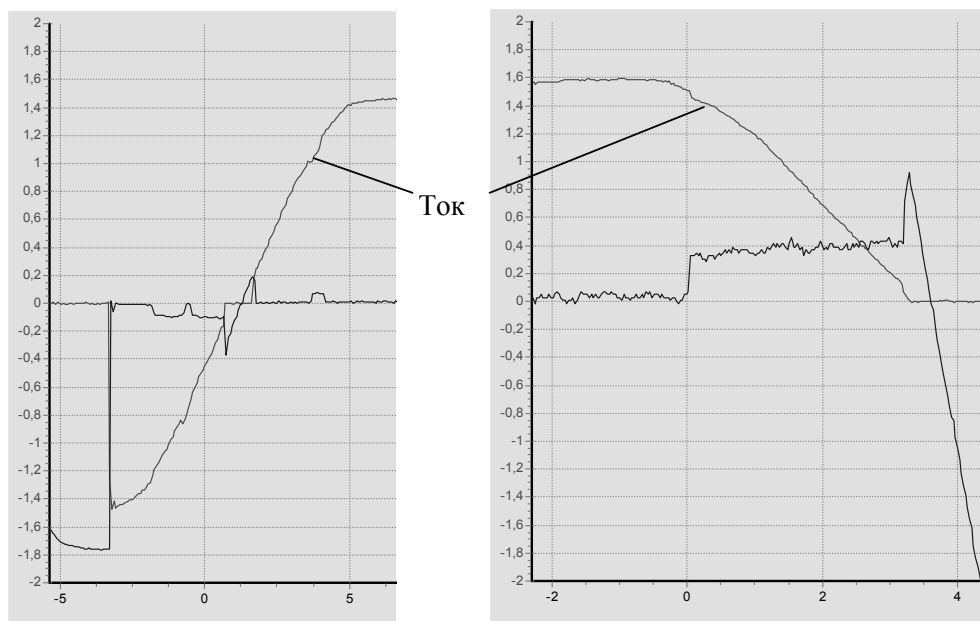


Рис. 1. Напряжение и ток контакта при включении (слева) и отключении (справа) активной нагрузки

Элементы решения первой задачи даны даже в учебной литературе [1], но мы несколько отклонились от них. На рис. 2, 3 заштрихована поверхность и объем неподвижного контакта. Снизу к нему усилием F_k со скоростью v_k приближается подвижный контакт массой M_k . Расстояние между контактами x . Коэффициент вязкого сопротивления воздуха обозначим R_k . Строго говоря, потери на вязкость после контакта должны характеризоваться другим коэффициентом, влияющим на величину отскока от поверхности после удара. После контакта начиная с $x = 0$ обе контактные поверхности упруго прогибаются, возникает сила отталкивания, которую мы принимаем пропорциональной квадрату величины взаимной деформации контактов. Одной единицей в принятой нами квадратичной зависимости мы моделируем закон упругости Гука, второй единицей мы моделируем увеличение поверхности контакта по мере сжатия. Этому описанию соответствует следующая система дифференциальных уравнений

$$v_k = dx/dt; M_k \cdot dv_k/dt = F_k - R_k \cdot v_k; F_k \leq F_k + A_k \cdot x_k^2. \quad (1)$$

Здесь A_k – коэффициент упругости. Когда нет контакта, коэффициент равен нулю. После соприкосновения поверхностей контакта он принимает заданное нами значение. Численное решение этой простой системы (1) дает нам показанные на рис. 2, 3 снизу процессы вибрации контактов. Мы сочли их вполне удовлетворительными.

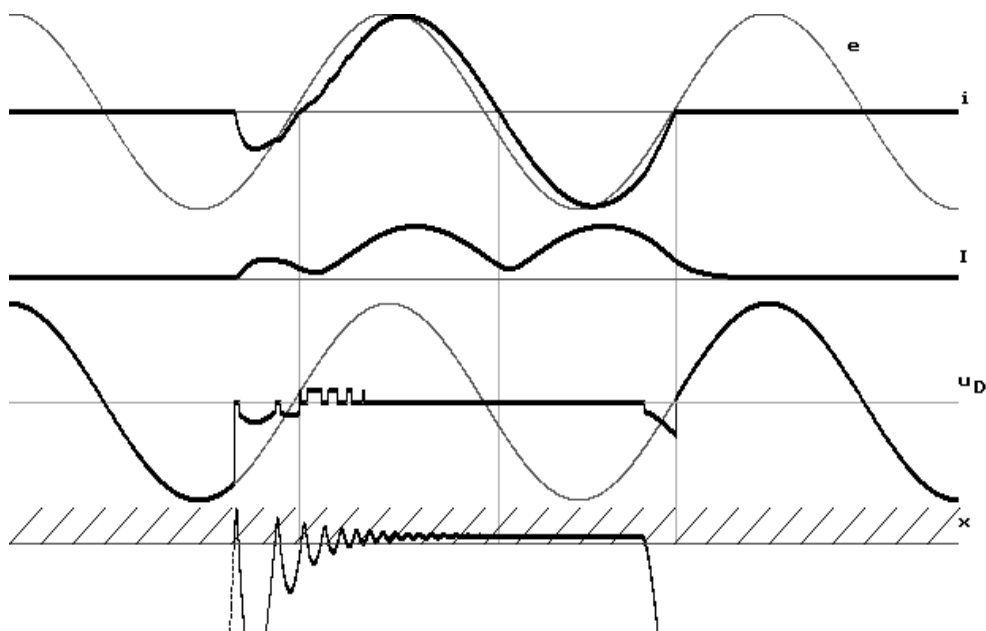


Рис. 2. Ток i , его действующее значение I , напряжение контакта u_D , расстояние между поверхностями x при учете явления искрения

Для решения второй задачи динамического моделирования искры переменного тока мы использовали статическое уравнение для напряжения дуги u_D постоянного тока I Г. Айртон [2]

$$u_D = a + b \cdot x_k + \frac{c + d \cdot x_k}{I}. \quad (2)$$

Здесь a – постоянное напряжение дуги, ни от чего не зависящее; b – напряжение дуги, линейно зависящее только от ее длины x_k ; c и d – аналогичные коэффициенты в обратно пропорциональной зависимости напряжения от тока дуги I . Из-за последнего с уменьшением тока напряжение дуги увеличивается до бесконечности. Сложные инерционные процессы накопления тепла и объемного электрического заряда в столбе дуги мы свели к инерционности действующего значения тока I в уравнении (2). Его мы определили корнем квадратным из инерционного квадрата среднеквадратичного тока $I = \sqrt{I^2}$. При этом I^2 воспринимаем как одну новую переменную (обозначена I^2 в программе), а не квадрат другой переменной. Вот она-то и обладает инерцией согласно дифуравнению простейшего апериодического звена

$$T_D \cdot dI^2/dt = i^2 - I^2. \quad (3)$$

Здесь i – мгновенный ток дуги; T_D – эквивалентная постоянная времени всех упомянутых сложных динамических процессов. Постоянные времени нагрева и остывания должны быть различными. При заданном графике мгновенного тока i на рис. 2, 3 по дифуравнению (3) построен график инерционного действующего тока I . Подстановка тока I в формулу (2) дает нам искомый график напряжения на контакте (на искре) u_D на рис. 2, 3.

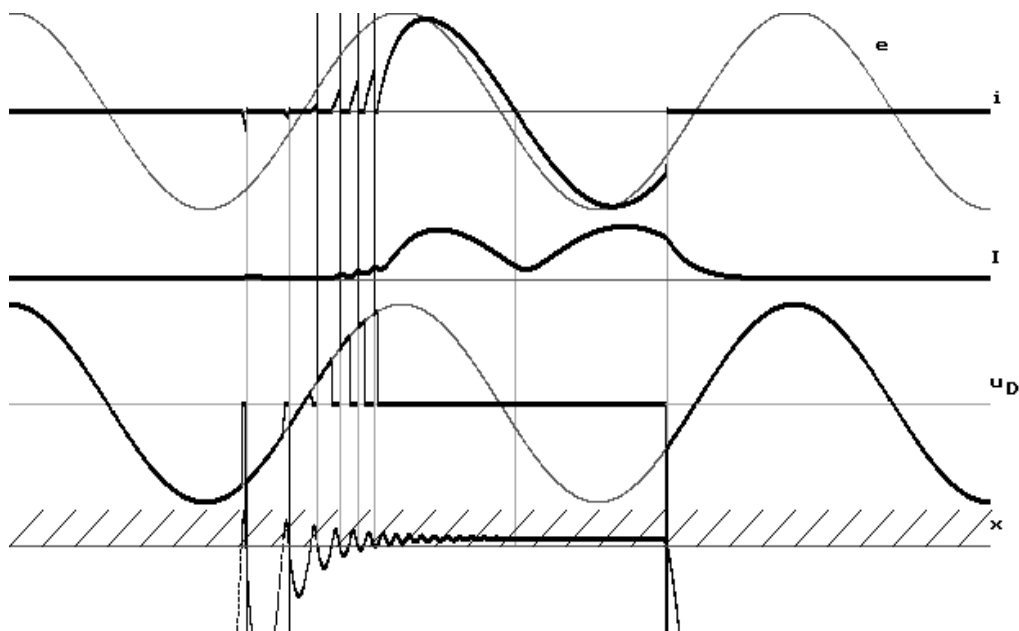


Рис. 3. Ток i , его действующее значение I , напряжение контакта u_D , расстояние между поверхностями x без учета явления искрения

Хотя научная часть статьи здесь закончена, на практике мы дольше мучались после этого места. Надо не запутаться в логических уравнениях,

что-то делать при разных соотношениях напряжения дуги и напряжений в анализируемой схеме. Схема выбрана простейшая: источник с напряжением e , цепь из активного R и индуктивного L элементов и контакт. Только после этого были получены диаграммы процессов на рис. 2, 3, которые хорошо качественно совпали с экспериментом на рис. 1. Для количественного совпадения надо подобрать параметры модели ($a, b, c, d, T_D, A_k, R_k, M_k$) из условий этого совпадения, а не из физического вникания в процессы механического контакта и искрения. – Это обычный прием автоматчиков.

Полученная модель позволяет не только посмотреть на процессы при вибрации контактов с учетом их искрения (рис. 2), но и на те же процессы без искрения (рис. 3). Видим пользу искрения для себя! В искру уходит накопленная в индуктивностях энергия, нет бесконечных коммутационных перенапряжений. Без искры (рис. 3) ток индуктивной цепи меняется скачком. Контакт с искрением (рис. 2) ведет себя как тиристор: он сразу включается после первого касания, а выключается только при естественном спаде тока. Контакт без искрения (рис. 3) не только выключается с опасными перенапряжениями, но и плохо включается, – ток дергается много раз!

Библиографический список

1. Чухин, А.А. Электрические аппараты. Общий Курс / А.А. Чухин. – М.: Энергоатомиздат, 1988.
2. Маринченко, В.А. Электрооборудование дуговых печей трехфазного тока / В.А. Маринченко. – М.: Гос. научно-техническое изд-во литературы по черной металлургии, 1955. – 468 с.