

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-00156, <https://rscf.ru/project/22-79-00156/> «Исследование тепловых и гидродинамических эффектов в нанодисперсных магнитных жидкостях для разработки моделей и методик расчёта высокоскоростных и высокотемпературных герметизаторов»*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Орлов Д.В., Михалёв Ю.О. Мышкин Н.К. Подгорков В.В., Сизов А.П. Магнитные жидкости в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1993. – 275 с.
2. Морозов Н.А., Казаков Ю.Б. Нанодисперсные магнитные жидкости в технике и технологиях. – Иваново : Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина, 2011. – 264 с.
3. Сайкин М.С. Магнитожидкостные герметизаторы технологического оборудования: монография. – Санкт-Петербург; Москва; Краснодар: Лань, 2017. – 136 с: ил.
4. Meng Z. An analysis on the magnetic fluid seal capacity / Z. Meng, Z. Jibin, H. Jianhui // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2006. – Vol. 303. – P.428–431. doi:10.1016/j.jmmm.2006.01.060

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВАКУУМНОГО ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ В ПРОГРАММНОЙ СРЕДЕ МАТЛАВ

**И.С. Патокин**

*Томский политехнический университет,  
ИШЭ, ОЭЭ, гр. А1-42*

Научный руководитель: А.Ю. Юшков, к.т.н. доцент ОЭЭ ИШЭ ТПУ

На сегодняшний день вакуумные выключатели (ВВ) широко используются в сетях среднего напряжения, благодаря своим отличным электрическим и дугогасительным свойствам. Основным их предназначением является отключение токов короткого замыкания. При размыкании контактов вакуумного выключателя образуется дуга из испарившегося материала контактов. Обычно дуга прерывается при первом переходе тока через ноль, поскольку взрывоэмиссионные процессы прекращаются, пары металла деионизируются, охлаждаются и конденсируются. Таким образом, зазор быстро восстанавливает свою высокую диэлектрическую прочность, способную выдержать переходное восстанавливающееся напряжение (ПВН). Однако так бывает не всегда.

В последуговой фазе иногда может сохраняться высокая проводимость промежутка, поскольку там сосредотачивается достаточно плотная плазма, образовавшаяся в течении цикла горения дуги. Помимо этого, вследствие все еще большой температуры электродов присутствуют пары металла с микрочастицами. Эти и другие факторы приводят к снижению диэлектрической прочности промежутка во время возникновения быстронарастающего ПВН, и, как следствие, к дальнейшему его повторному пробую.

Общепринято, сопровождающие последуговой ток процессы условно делить на три фазы. На первой фазе перед нулевым током ионы покидают катод и двигаются в сторону анода. После достижения током нуля только что образовавшиеся ионы продолжают двигаться к аноду по инерции. Электроны, компенсируя ионный ток, выравнивают свою скорость со скоростью ионов, поэтому общий электрический ток через промежуток равен нулю. На второй фазе процесс продолжается до тех пор, пока электроны не изменят свое направление; до этого момента суммарный заряд внутри промежутка равен нулю. При отсутствии заряда напряжение на зазоре остается нулевым. Как только электроны меняют свое направление, последуговой ток переходит во вторую фазу, в которой электроны покидают катод, оставляя

за собой ионный слой пространственного заряда. Теперь зазор между электродами не является нейтральным, и на него накладывается ПВН. На третьей фазе катодный слой продолжает расширяться, пока не достигнет нового анода. В этот момент начинается третья фаза последудугового тока. Электрический ток уменьшается, так как все электроны покинули межэлектродный промежуток. Электрическое поле между контактами перемещает оставшиеся ионы к катоду, но ток, возникающий при этом, ничтожно мал.

В данной работе для анализа критической для выключателя фазы последудугового тока используется continuous transition model (СТМ) Эндрюса-Варея, которая описывает рост катодного слоя ( $s$ ) ионного пространственного заряда [1]. Вместе с этим в модели учитывается и взаимодействие внешней цепи с остаточной плазмой дуги.

Модель СТМ представлена следующими уравнениями:

$$s^2 = \frac{4\varepsilon_0 U_0}{9\rho_i} \left[ \left( 1 + \frac{U_{TRV}}{U_0} \right)^{\frac{3}{2}} + \frac{3U_{TRV}}{U_0} - 1 \right] \quad (1)$$

$$U_0 = \frac{M_i}{2e} \left( v_i + \frac{ds}{dt} \right)^2 \quad (2)$$

$$i_{pa} = A\rho_i \left( \frac{ds}{dt} + v_i \right), \quad (3)$$

где  $\varepsilon_0$  – абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума;  $U_{TRV}$  – ПВН;  $M_i$  – масса ионов;  $e$  – элементарный заряд;  $A$  – объем разрядной области;  $\rho_i$  – заряд ионов;  $v_i$  – скорость дрейфа ионов.

Первое уравнение (1) описывает расширение катодного слоя. Второе уравнение (2) определяет электрический потенциал ионов на границе катодного слоя, который зависит от скорости расширения слоя ( $ds/dt$ ) и скорости дрейфа ионов металла ( $v_i$ ). Наконец, третье уравнение (3) описывает последудуговой ток, который протекает через ВВ после начала роста катодного слоя, но до завершения процесса отключения. Ток имеет две составляющие: это ток смещения, который пропорционален скорости движения катодного слоя ( $ds/dt$ ) (аналогично току смещения, обусловленному электрическим полем в уравнении Максвелла), и проводящую составляющую, зависящую от скорости движения ионов ( $v_i$ ).

Моделирование взаимодействия высоковольтной цепи и последудугового тока выключателя выполняется в программном комплексе MATLAB 2022b. Предварительно составляются три системы дифференциально-алгебраических уравнений (ДАУ), которые включают в себя уравнения напряжения и тока внешней по отношению к выключателю синтетической цепи, а также уравнения СТМ.

Из различных существующих курсов по MATLAB известно, что для решения жестких систем уравнений (в частности, ДАУ) применяется многошаговый метод переменного порядка ode15s, использующий формулы численного «дифференцирования назад».

В качестве примера на рис. 1 представлена часть кода для фазы II.

Стоит заметить одну важную особенность при решении ДАУ в MATLAB. Для того чтобы можно было использовать решатель ode15s, систему уравнений необходимо представить в виде [3]:

$$M(t)y' = F(t, y) \quad (4)$$

где  $M(t)$  – матрица масс (своя для каждой фазы).

Полученные в процессе моделирования графики представлены на рис. 2.

Представленная модель является относительно упрощенной, и представляет для нас интерес для дальнейшего анализа взаимодействия вакуумного выключателя с электрической цепью.

```
[t,y] = ode15s(@fII, [t(end) t_final], y(end,:), optionsII, ...
A, q_iScaled, v_0, V, U_s, L, C_ep, d, M_iScaled, eps_0);
function dydt = fII(t, y, A, qi, v_0, V, Us, L, C_ep, M_i)
dydt(1,1) = -y(4)/(qi*V); % (Концентрация ионов)'
dydt(2,1) = (y(3) - y(4))/C_ep; % (Напряжение)'
dydt(3,1) = (Us - y(2))/L; % (Ток контура)'
dydt(4,1) = y(4) - A*qi*y(1)*v_0; % (Ток выключателя)'
dydt(5,1) = y(5) - (M_i/(2*qi))^(1/2)*v_0; % (Напряжение)'
dydt(6,1) = 0; % (Напряженность поля)'
dydt(7,1) = 0; % (Толщина слоя ионного заряда)'
end
```

Дополнительно настраиваемые параметры решателя ode15s

Функция системы дифференциальных уравнений фазы II

Рис. 1. Пример кода на языке MATLAB для фазы II (аналогично для оставшихся фаз)

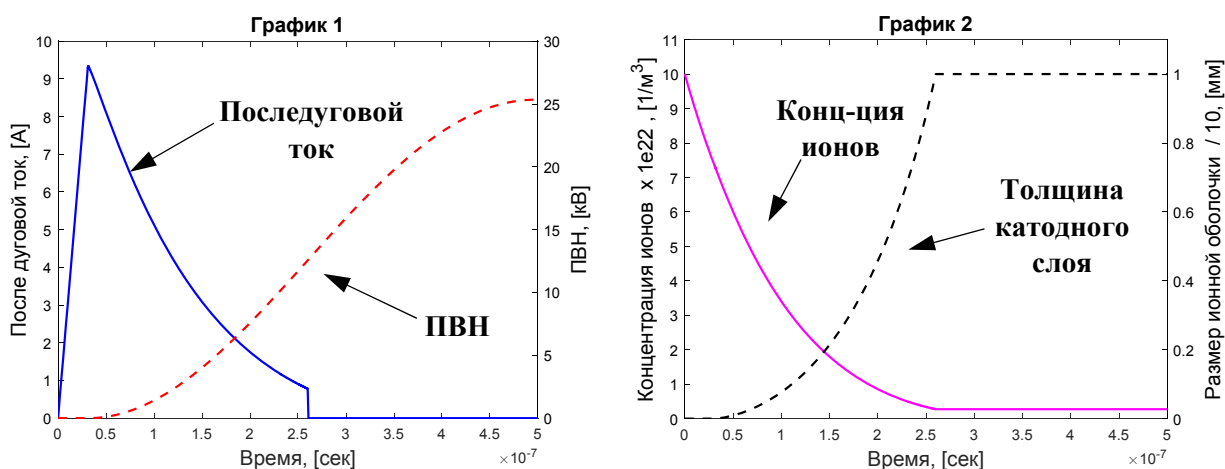


Рис. 2. График 1: Синяя линия – последуговой ток выключателя, красная пунктирная линия – переходное восстанавливающееся напряжение; График 2: Фиолетовая линия – концентрация ионов, черная пунктирная линия – размер ионной оболочки

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Andrews J.G., Varey R.H. Sheath growth in a Low Pressure Plasma // The Physics of Fluids – 1970. – V. 14. – No. 2. – P. 339–343.
2. Ануфриев И.Е., Смирнов А.Б., Смирнова Е.Н. MATLAB 7. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 1104 с.: ил.;
3. Дьяконов В.П. MATLAB. Полный самоучитель. – М.: ДМК Пресс, 2012. – 768 с.: ил.

## ОЦЕНКА ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ КАБЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ ПРИ ВАКУУМЕ

В.П. Здорникова

Томский политехнический университет,  
ИШЭ, ОЭЭ, гр. 5АМЗЗ

Научный руководитель: А.П. Леонов, к.т.н., доцент ОЭЭ ИШЭ ТПУ

Бортовая кабельная сеть (БКС), входящая в состав космического аппарата (КА), объединяет в единую систему бортовую аппаратуру с целью обеспечения электрической связи. Срок активного существования КА напрямую связан со сроком службы БКС [1].