

В.И.Новаш, Е.И.Шевцов, Ю.В.Бладыко

ЛОГИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПЕРЕМЕЖАЮЩЕЙСЯ ДУГИ В ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЯХ ЗАЩИТ ОТ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ

Математические модели, воспроизводимые на ЦВМ (цифровые модели), являются эффективным средством исследования поведения устройств защиты от однофазных замыканий на землю при различных переходных процессах. Наибольший интерес представляет исследование переходных процессов в защищаемом объекте и оценка поведения защиты при замыканиях через электрическую дугу [1, 2].

Достоверность результатов цифрового моделирования в значительной степени зависит от полноты и правильности отражения в математической модели основных свойств дугового замыкания:

а) дуговой промежуток считается в рассматриваемый момент времени разомкнутым, если он был разомкнут в предшествующий момент времени и мгновенное значение напряжения на нем u не достигло некоторой заданной величины напряжения пробоя $U_{пр}$

$$|u_{д}| < U_{пр}; \quad (1)$$

б) дуговой промежуток также считается разомкнутым, если он был замкнут в предшествующий момент времени, но мгновенное значение тока через него $i_{д}$ в данный момент времени стало меньше некоторой заданной величины $I'_{до}$ (рис. 1)

$$|i_{д}| < I'_{до}, \quad (2)$$

и скорость изменения тока $\frac{di_{д}}{dt}$ в данный момент времени стала меньше некоторой заданной величины $I'_{до}$

$$\left| \frac{di_{д}}{dt} \right| < I'_{до}. \quad (3)$$

При выполнении указанных условий ток через место повреждения принимается равным нулю. Напряжение на дуговом промежутке определяется из уравнений, соответствующих схеме объекта и разомкнутой цепи замыкания. Задавая достаточно большие значения $I'_{до}$, можно воспроизводить погасание дуги при прохождении через нуль тока во время высокочастотного

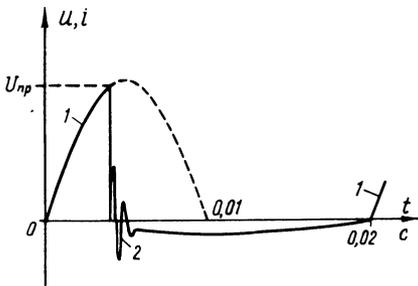


Рис. 1. Характер изменения напряжения и тока дуги при пробое дугового промежутка: 1 — напряжение на дуговом промежутке; 2 — ток дуги.

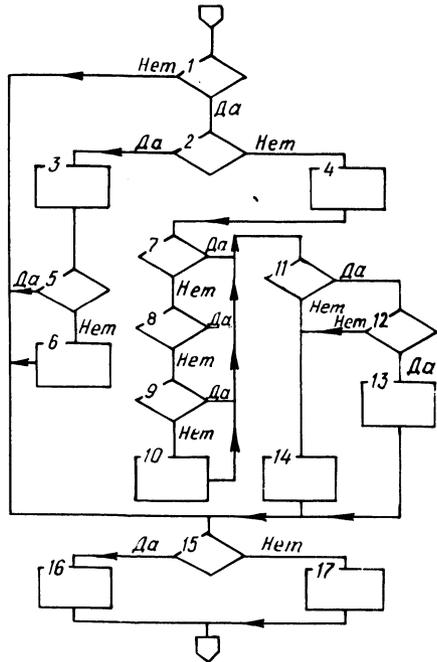


Рис. 2. Блок-схема алгоритма с раздельной проверкой условий возникновения и погасания дуги:

1 — первый такт шага численного интегрирования?; 2 — $M(\text{пред}) = 0?$; 3 — вычисление $u_{\text{д}}$; 4 — вычисление $i_{\text{д}}$, $\frac{di_{\text{д}}}{dt}$; 5 — $|u_{\text{д}}| < U_{\text{пр}}?$; 6 — вычисление

$M = 1, i_{\text{д}}(\text{пред}) = 0, NC = 1$, задание

уменьшенного шага; 7 — $NC = 0?$;

8 — $|i_{\text{д}}| > I_{\text{д1}}?$; 9 — $|\frac{di_{\text{д}}}{dt}| > I'_{\text{д1}}?$;

10 — вычисление $NC = 0$, задание большего шага; 11 — $i_{\text{д}} \cdot i_{\text{д}}(\text{пред}) < 0?$; 12 — $|\frac{di_{\text{д}}}{dt}| < I'_{\text{д0}}?$; 13 —

вычисление $M = 0, i_{\text{д}} = 0$, задание большего шага; 14 — вычисление $i_{\text{д}}(\text{пред}) = i_{\text{д}}$; 15 — $M = 0?$; 16, 17 — вычисление параметров, зависящих от состояния дугового промежутка.

процесса разряда и перезаряда емкостей системы; при малых значениях $I'_{до}$ дуга будет погасать при прохождении через нулевое значение тока промышленной частоты.

Если хотя бы одно из условий (1)–(3) не выполняется, дуговой промежуток считается замкнутым, ток через него определяется из уравнений, соответствующих схеме объекта с замкнутым дуговым промежутком. Напряжение на дуговом промежутке определяется как падение напряжения от тока дуги на некотором активном сопротивлении r'_d :

$$u_d = r'_d i_d. \quad (4)$$

Сопротивление дуги в общем случае нелинейно и может быть представлено следующей зависимостью:

$$r'_d = \frac{1}{B + C |i_d|}. \quad (5)$$

Величина B определяет верхний уровень значений r'_d при малых токах. Этот уровень приходится выбирать из условий обеспечения устойчивости численного интегрирования дифференциальных уравнений модели при приемлемых с точки зрения расхода машинного времени значениях шага интегрирования. Величина C определяется верхним уровнем напряжения на дуговом промежутке при наибольших значениях тока дуги. Следует отметить, что если исследование режима дуги не является самоцелью, сопротивление дуги можно принять линейным и выбирать его значение таким, при котором обеспечивается затухание высокочастотной составляющей тока разряда и перезарядки емкостей сети в течение 2–3 периодов.

Наиболее простая программная реализация условий возникновения и погасания дуги получается с помощью логического выражения [1, 2]

$$|u_d| < U_{пр} \quad \text{и} \quad |i_d| < I_{до} \quad \text{и} \quad \left| \frac{di_d}{dt} \right| < I'_{до} \quad (6)$$

Если это выражение истинно, дуга не горит, если оно ложно – дуговой промежуток пробит.

Основная трудность использования логического выражения (6) заключается в том, что величины u_d , i_d можно определить лишь зная состояние дугового промежутка в рассматриваемый момент времени. Поэтому приходится включать выражение (6) в итерационный процесс, либо пользоваться данными с предыдущего шага численного воспроизведения модели. Выражение (6) нельзя использовать для уменьшения шага, которое необходимо для более точного воспроизведения высокочастотного

процесса. Дело в том, что часто после затухания высокочастотного процесса расчет можно вести с меньшим шагом и при замкнутом дуговом промежутке.

На рис. 2 приведена блок-схема алгоритма определения состояния дугового промежутка и выбора шага численного интегрирования дифференциальных уравнений модели с отдельной проверкой условий (1)–(3). Логический блок 1 обеспечивает неизменное состояние дугового промежутка в течение всего шага численного интегрирования, что необходимо при использовании многотактных методов (Рунге-Кутта и др.). В исходных данных признак состояния дугового промежутка M и ток дуги i_d задаются равными нулю. Поэтому на первом же шаге счета производится проверка условия (1). При его невыполнении в блоке 6 вычисляются: признак $M=1$, все необходимые параметры для последующего решения уравнений системы с замкнутым дуговым промежутком и задаются уменьшенные шаги счета и печати.

На последующих шагах после пробоя дугового промежутка логический блок 2 передает управление группе операторов, проверяющих условия обратного перехода на увеличенный шаг счета (блоки 8, 9) и условия погасания дуги (блоки 11, 12). Переход на увеличенный шаг производится после погасания дуги, а также при замкнутом дуговом промежутке после затухания высокочастотного переходного процесса. Признаком затухания является уменьшение скорости изменения тока дуги на шаге интегрирования до заданной величины $I'_{д1}$ при достаточно малых значениях тока дуги, меньших некоторого заданного значения $I_{д1}$. В качестве признака перехода тока дуги через нуль вместо условия (2) удобно использовать знак произведения $i_d \cdot i_{д(пред)}$, которое при таком переходе в любую сторону становится отрицательным (блок 11). Логический блок 7 служит для того, чтобы исключить многократную работу блоков 8–10 после перехода на меньший шаг при замкнутом дуговом промежутке. Величина NC вычисляется равной 1 в блоке 6 и равной нулю в блоке 10.

Задавая соответствующие значения $U_{пр}$, $I'_{до}$, можно воспроизводить как устойчивые металлические замыкания ($I'_{до} \leq 0$), так и замыкания через перемежающуюся дугу, регулярно зажигающуюся и гаснущую на каждом периоде ($I'_{до} > 0$). Для воспроизведения перемежающейся дуги с нерегулярными пробоями величину $U_{пр}$ следует задавать как случайную величину в ограниченном диапазоне от генератора случайных чисел.

Описание перемежающейся дуги по алгоритму рис. 2 использовано в реализованной на ФОРТРАНе программе расчета усовершенствованного варианта защиты генератора с наложенным выпрямленным напряжением.

Л и т е р а т у р а

1. Новаш В.И., Мороз В.К. Работа защиты от замыканий на землю генераторов с наложенным выпрямленным напряжением в переходных режимах. – Электричество, 1973, № 6. 2. Новаш В.И., Савин С.Н. Расчеты и анализ переходных процессов в компенсированной сети с учетом нелинейности дугогасящей катушки. – Изв.вузов СССР. Сер. Энергетика, 1978, № 2.