

Анализ методов моделирования коммутационных переходных процессов в электрических сетях с изолированной нейтралью

НОВОЖИЛОВ А.Н., ИСУПОВА Н.А., КОЛЕСНИКОВ Е.Н., КУДАБАЕВ Д.А.

Сопоставлены результаты моделирования процесса отключения индуктивной нагрузки от сети с помощью классического метода и систем схемотехнического моделирования в виде Electronics Workbench и Micro-cap. Даны рекомендации по поводу их применения.

Ключевые слова: сеть с изолированной нейтралью, коммутационные перенапряжения, расчёт.

Конфигурация электроэнергетических систем постоянно меняется из-за происходящих в ней коммутационных переключений. Коммутационные переключения, в свою очередь, сопровождаются переходными процессами. Одним из характерных коммутационных переключений является включение или отключение присоединения к электрической сети с изолированной нейтралью. И если первое, как правило, не представляет особой опасности, то второе может сопровождаться значительными

In this work results of modeling of process of switching-off of inductive loading from a network by means of a classical method and systems circuitry modeling in the form of Electronics Workbench and Micro-cap are compared. Recommendations concerning their application are made.

Key words: network with the isolated neutral, switching an overvoltage, calculation.

ми перенапряжениями. Особенно если коммутация осуществляется вакуумным выключателем.

Моделировать коммутационные переходные процессы можно по-разному. Например, рассчитывать с использованием классических методов, изложенных в ТОЭ [1]. Однако несмотря на внешнюю простоту такой подход не каждому под силу. Дело в том, что расчёт вручную очень трудоёмок. А использование для этого ЭВМ требует навыка программирования.

Кроме того, подробности моделирования, как правило, в публикациях не излагаются [2, 3]. С другой стороны, широко известны достаточно простые системы схемотехнического моделирования Electronics Workbench и Micro-cap, которые также позволяют моделировать переходные процессы в электрических схемах. Однако точность моделирования таких задач электроэнергетики с их помощью неизвестна. В этой работе делается попытка сопоставить результаты моделирования процесса отключения индуктивной нагрузки от сети различными методами, оценить их точность и дать рекомендации по поводу применения.

Математическая модель. Для простоты рассматривается появление перенапряжений в простейшей сети, питающей индуктивную нагрузку, которая изображена на рис. 1,а. Эта сеть содержит источник питания переменного тока с угловой частотой ω и напряжением U , кабельную линию длиной l и сечением s , а также нагрузку в виде асинхронного двигателя M или трансформатора. Её эквивалентная схема приведена на рис 1,б, где R_K и C_K – активное сопротивление и ёмкость кабеля; R_M и L_M – активное сопротивление и индуктивность двигателя. Режимов моделирования два. Первый до коммутации, т.е. при замкнутых контактах выключателя QF , а второй после коммутации – при его разомкнутых контактах.

До коммутации ток двигателя

$$\dot{I}_{mM} = \dot{U}_m / (R_K + R_M + j\omega L_M) = \dot{U}_m / Z_1, \quad (1)$$

где \dot{U}_m и \dot{I}_{mM} – амплитудное значение напряжения питания и тока в цепи двигателя.

Мгновенные значения напряжения на ёмкости и тока в двигателе:

$$u_C = U_{mC} \cos \omega t; \quad i_M = I_{mM} \cos(\omega t + j_M), \quad (2)$$

где j_M – сдвиг по фазе тока двигателя относительно питающего напряжения.

Таким образом, энергия, запасаемая в элементах схемы в произвольный момент времени

$$W_1 = \frac{C_K u_C^2}{2} + \frac{L_M i_M^2}{2} = \frac{C_K U_{mC}^2 \cos^2 \omega t}{2} + \frac{L_M I_{mM}^2 \cos^2(\omega t + j_M)}{2} = \frac{U_{mC}^2}{2} \left[C_K \cos^2 \omega t + \frac{L_M \cos^2(\omega t + j_M)}{Z_1^2} \right] = \frac{U_{mC}^2}{2} W_1^* \quad (3)$$

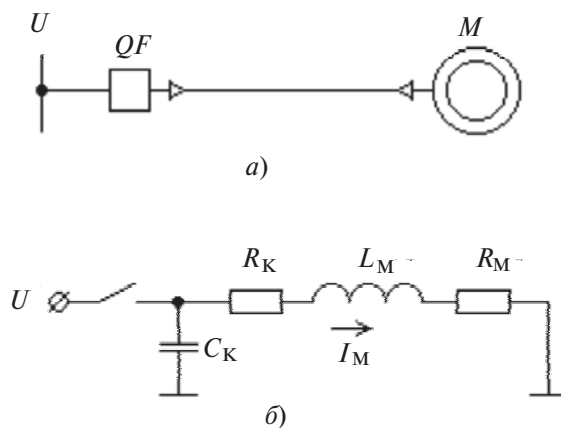


Рис. 1. Простейшая (а) и эквивалентная (б) схемы фидера для питания двигателя

После коммутации контакты выключателя QF размыкаются, двигатель отключается от источника питания, а в его цепи происходит переходной процесс за счёт запасённой энергии W_1 . Электрические параметры этого процесса с учётом [1] определяются следующим образом.

Входное сопротивление цепи двигателя после коммутации

$$Z_{вх}(\omega t) = (R_K + R_M) + j\omega L_K + \frac{1}{j\omega C_K}.$$

Характеристическое уравнение получают, заменив в этом выражении $j\omega$ на p и приравняв его нулю:

$$Z_{вх}(p) = (R_K + R_M) + pL_K + \frac{1}{pC_K} = 0.$$

В итоге

$$p^2 L_K C_K + pC_K(R_K + R_M) + 1 = 0. \quad (4)$$

Обычно при решении квадратных уравнений принимают

$$a = L_K C_K; \quad b = C_K(R_K + R_M); \quad c = 1, \quad \text{дискриминант } d = b^2 - 2ac.$$

Перенапряжение может возникнуть только при колебательном процессе, т.е. при $d < 0$. Это соответствует комплексным, попарно сопряжённым корням уравнения (4). В этом случае в соответствии с [1] напряжение на ёмкости после коммутации

$$u_{C,cb} = U_{mC} e^{-dt} \cos(\omega_0 t), \quad (5)$$

где $d = \frac{-b}{2a}; \quad \omega_0 = \frac{\sqrt{d}}{2a};$

U_{mC0} – амплитуда напряжения на конденсаторе без учёта рассеяния энергии в активном сопротивлении колебательного контура; ω_0 – угловая частота цепи двигателя после коммутации.

Таким образом, мгновенные значения напряжения на ёмкости и тока в двигателе после коммутации

$$i_{mM0} = \frac{\dot{U}_{mC0}}{R_K + R_M + j\omega_0 L_M + 1/j\omega_0 C_K} = \frac{\dot{U}_{mC0}}{Z_{вх0}}; \quad (6)$$

$$i_{M0} = \frac{u_{C0}}{R_K + R_M + j\omega_0 L_M + 1/j\omega_0 C_K} = \frac{u_{C0}}{Z_0}. \quad (7)$$

Величину U_{mC0} определяют следующим образом. Энергия, запасаемая элементами схемы после коммутации, без учёта потерь в активных сопротивлениях

$$W_0 = \frac{C_K u_{C0}^2}{2} + \frac{L_M i_{mM0}^2}{2} = \frac{C_K U_{mC0}^2 \cos^2 \omega_0 t}{2} + \frac{L_M I_{mM0}^2 \cos^2(\omega_0 t + j_{M0})}{2} = \frac{U_{mC0}^2}{2} \cdot C_K \cos^2 \omega_0 t + \frac{L_M \cos^2(\omega_0 t + j_{M0})}{Z_0^2} \cdot \frac{U_{mC0}^2}{2} W_0^*, \quad (8)$$

где j_{M0} – сдвиг по фазе тока двигателя относительно напряжения на конденсаторе после коммутации.

Если приравнять энергию, запасаемую контуром до и после коммутации, а затем преобразовать, то амплитуда напряжения на конденсаторе

$$U_{mC0} = U_{mC} \sqrt{W/W_0},$$

а кратность перенапряжения и частоты

$$k_U = \frac{U_{mC0}}{U_{mC}} = \sqrt{W/W_0}; \quad k_w = \omega_0 / \omega. \quad (9)$$

Для определения кратности перенапряжения k_U в конкретном случае активное сопротивление R_K и ёмкость C_K кабеля находят, например, по справочнику [4]. Сопротивление

R_M двигателя можно просто измерить, а индуктивность и его индуктивное сопротивление найти из соотношения

$$L_M = \frac{X_M}{\omega} = \frac{U_{НОМ}^2}{\omega P_M},$$

где $U_{НОМ}$ и P_M – номинальные значения напряжения и мощности двигателя.

Результаты моделирования зависимости $k_U = f(\omega t)$ с использованием уравнения (9), а также систем схемотехнического моделирования Micro-cap и Electronics Workbench в виде кривых 1–3 соответственно приведены на рис. 2. Они получены для схемы, у которой $U_m = 100$ В, $R_K + R_M = 100$ Ом, $C_K = 0,075$ мкФ и $L_M = 0,75$ Гн.

Из рис. 2 видно, что значение k_U в зависимости от угла отключения тока, определяемое с помощью Electronics Workbench, изменяется хаотически. Поэтому моделирование коммутационных переходных процессов в электрических сетях с изолированной нейтралью с помощью Electronics Workbench неприемлемо и далее не рассматривается.

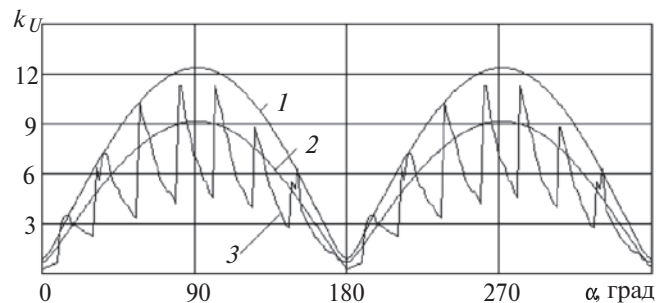


Рис. 2. Зависимости кратности перенапряжения в зависимости от ωt

Результаты моделирования. Результаты моделирования максимального значения коэффициента перенапряжения k_{Umax} и частоты свободных колебаний f_0 по уравнению (9) и с помощью прикладной программы Micro – cap при различных значениях элементов C_K и L_M схемы приведены в таблице.

Параметры элементов	По уравнению (9)		Micro – cap	
	k_U	k_w	k_U	k_w
$C_K = 0,075$ мкФ; $L_M = 0,75$ Гн	12,35	13,42	9,74	12,84
$C_K = 0,075$ мкФ; $L_M = 0,075$ Гн	9,76	42,38	3,50	38,68
$C_K = 0,0075$ мкФ; $L_M = 0,75$ Гн	39,00	42,44	15,48	38,38
$C_K = 0,0075$ мкФ; $L_M = 0,075$ Гн	30,79	134,2	4,64	126,58

Из таблицы видно, что частота f_0 , определяемая с помощью Micro-cap, в приведённом диапазоне изменения частот отличается от рассчитанной по (5) не более чем на 10%. В то же время, различие k_U в отдельных случаях достигает 660%. Однако, как показывает анализ схем подключения двигателей и трансформаторов, параметры этих схем близки к тем, которые расположены в первой и второй строках таблицы. В этом случае погрешность моделирования будет значительно меньше.

Полученные выражения для определения кратности перенапряжения характерны для сетей с вакуумными выключателями. Эти выключатели получили широкое распространение в качестве коммутирующих устройств сетей 6–35 кВ из-за высокой надёжности и повышенного ресурса. Именно им характерен «срез тока». Под этим явлением понимается способность выключателя практически мгновенно отключать токи до их естественного перехода через нуль. Как правило, для вакуумных выключателей «срез тока» происходит при ωt не более 5° .

На рис. 3 приведены результаты моделирования зависимостей $u_C = f(\omega t)$ до и после коммутации по уравнениям (9) с помощью системы схемотехнического моделирования Micro-cap при $\omega t = 5^\circ$. Как видно из рис. 3 по кратности перенапряжения и частоты различаются всего на 18% и 4,6% соответственно. Из этого следует, что Micro-cap позволяет решать задачи этого класса в электроэнергетике с достаточной высокой точностью.

Список литературы

1. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. М.: Высшая школа, 1967.
2. Беляков Н.Н., Кузьмичева К.И. Ограничение перенапряжений при дуговых замыканиях на землю в сети 6 кВ собственных нужд электростанций с помощью ОПН // Электрические станции. 1991. №4. С.78–84.
3. Кузьмичева К.И., Подъячев И.Н., Шлейфман И.Л. Ограничение перенапряжений при отключении вакуумными выключателями пусковых токов электродвигателей с помощью ОПН // Электрические станции. 1996. №4. С.45–49.
4. Крючков И.П., Кувшинский Н.Н., Неклепаев Б.Н. Электрическая часть электростанций и подстанций. М.: Энергия, 1978.

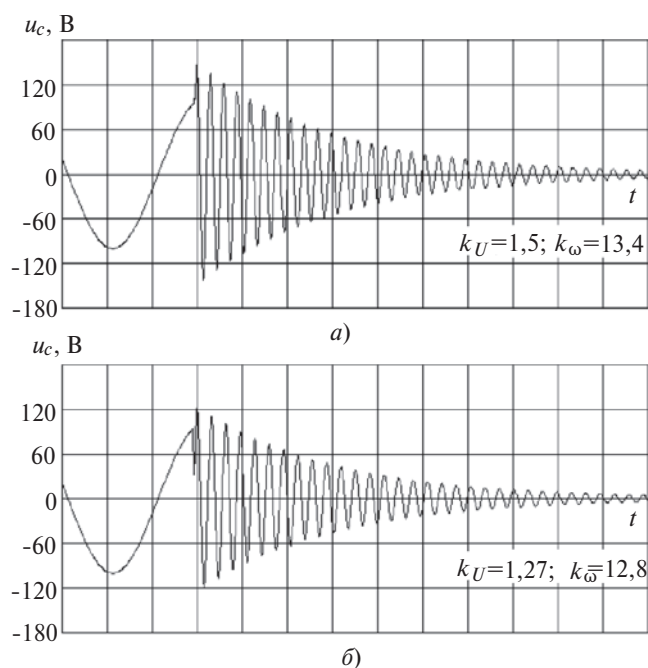


Рис. 3. Зависимости перенапряжения от ωt до (а) и после (б) коммутаций

Новожилов Александр Николаевич – профессор кафедры «Автоматизации и управления» Павлодарского государственного университета им. С. Торайгырова (ПГУ), доктор техн. наук. Окончил Павлодарский индустриальный институт в 1977 г. по специальности «Электрические сети и системы». Кандидатскую диссертацию по теме «Разработка защиты асинхронных двигателей от витковых замыканий с повышенной чувствительностью» защитил в Уральском политехническом институте в 1986 г. В 2002 г. в Алматинском институте «Энергетика и связь» защитил докторскую диссертацию по теме «Построение релейной защиты асинхронного двигателя с повышенной чувствительностью на встроенных преобразователях (теория, расчёты, практика)».

Исупова Наталья Александровна – старший преподаватель кафедры «Автоматизации и управления» Павлодарского ГУ, аспирант ОмГТУ, магистр. Окончила ПГУ 2004 г.

Колесников Евгений Николаевич – магистрант Павлодарского ГУ.

Кудабаев Даурен Амантаевич – докторант Павлодарского ГУ по специальности «Автоматизация и управление», магистр. Окончил ПГУ в 2010 г.