

УДК 621.313.018.24

А. Н. Бесараб, В. Н. Невольниченко, М. Ю. Шабовта, кандидаты техн. наук

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ИНЖЕНЕРНЫХ РАСЧЕТОВ ЗНАЧЕНИЙ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ И АПЕРИОДИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩИХ ТОКА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В СЛОЖНЫХ СХЕМАХ

Аннотация. Предложена математическая модель сложной системы электроснабжения, расчетная схема которой состоит из ветвей генератора, системы и общей ветви с сопротивлением, по которой протекает ток короткого замыкания от всех источников. Модель используется для массовых инженерных расчетов тока трехфазного короткого замыкания для произвольного момента времени и выделения из кривой изображающего вектора тока периодической и аperiodической составляющих.

Ключевые слова: математическая модель, электромеханический переходный процесс, синхронные машины, изображающий вектор, ток короткого замыкания, потокосцепления, вращающаяся система координат, периодическая составляющая, аperiodическая составляющая, система возбуждения

A. Besarab, Ph.D., V.Nevolnichenko, Ph.D., M. Shabovta, Ph.D.

MATHEMATICAL MODEL FOR ENGINEERING CALCULATIONS OF VALUES OF PERIODIC AND APERIODIC COMPONENTS OF CURRENT OF SHORT CIRCUIT IN DIFFICULT SCHEMES

Abstract. The mathematical model of difficult system of power supply which settlement scheme consists of branches of the generator, system and the general branch with a resistance on which current of short circuit from all sources proceeds is offered. Model is used for mass engineering calculations of current of three-phase short for any timepoint and allocation from a curve of the representing vector of current of periodic and aperiodic components.

Keywords: mathematical model, the electromechanical transition process, synchronous machines representing a vector, short circuit, flux linkage, rotating coordinate system, periodic component, aperiodic component, excitation system

O.M. Бесараб, В. М. Невольниченко, М. Ю. Шабовта, кандидаты техн. наук

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДЛЯ ІНЖЕНЕРНИХ РОЗРАХУНКІВ ЗНАЧЕНЬ ПЕРІОДИЧНОЇ ТА АПЕРІОДИЧНОЇ СКЛАДОВОЇ СТРУМУ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ У СКЛАДНИХ СХЕМАХ

Анотація. Запропонована математична модель складної системи електропостачання, розрахункова схема якої складається з гілок генератора, системи і загальної гілки із опором, по якій протікає струм короткого замикання від всіх джерел. Модель використовується для масових інженерних розрахунків струму трифазного короткого замикання для довільного моменту часу і виділення з кривої зображувального вектору струму періодичної та аperiodичної складових.

Ключові слова: математична модель, електромеханічний перехідний процес, синхронні машини, зображувальний вектор, струм короткого замикання, потокосцеплення, обертова система координат, періодична складова, аperiodична складова, система збудження

Введение

При массовых инженерных расчетах токов короткого замыкания (КЗ) для выбора выключателей по коммутационной способности согласно [1; 9] возникает необходимость выделения из кривой изменения тока КЗ периодической и аperiodической составляющих. Для нахождения изменения во времени тока КЗ в сложной схеме может быть использована математическая модель для расчетной схемы, представленной в виде трехлучевой звезды, с использованием для синхронных машин «полных» систем дифференциальных уравнений Парка-Горева [3 – 7; 10]. При расчетах токов КЗ в питающей части системы вблизи источников в отличие от [10] может быть использована модель, в которой для всех лучей звезды расчетной схемы уравнения записываются во вращающейся со скоростью ротора эквивалентного генератора системе координат $d, q, 0$. Такой подход позволяет получить значительное повышение вычислительной устойчивости численного решения системы дифференциальных уравнений.

© Бесараб А.Н., Невольниченко В.Н., Шабовта М.Ю., 2015

Математическая модель анализа переходных процессов при записи уравнений элементов в системах координат d, q

Расчёт изменения тока КЗ для расчётной схемы рис. 1 связан с решением системы дифференциальных уравнений (ДУ), которую можно представить в следующей форме:

$$\begin{aligned} \frac{d\Psi_d}{dt} &= (-U_d - (1+s)\Psi_q - r_s i_d) \omega_0, \\ \frac{d\Psi_q}{dt} &= (-U_q + (1+s)\Psi_d - r_s i_q) \omega_0, \\ \frac{d\Psi_f}{dt} &= \left(\frac{U_f r_f}{x_{ad}} - r_f i_f \right) \omega_0, \\ \frac{d\Psi_{1d}}{dt} &= -\omega_0 r_{1d} i_{1d}, \\ \frac{d\Psi_{1q}}{dt} &= -\omega_0 r_{1q} i_{1q}, \\ \frac{ds}{dt} &= \frac{(M_{\text{max}} - \Psi_d i_q + \Psi_q i_d)}{T_j}, \\ \frac{d\delta}{dt} &= s \omega_0; \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned} \frac{di_{GSd}}{dt} &= \frac{\omega_0}{x_{GS}} (U_d + E_{GS} \sin \delta - (1+s)x_{GS}i_{GSq} - R_{GS}i_{GSd}), \\ \frac{di_{GSq}}{dt} &= \frac{\omega_0}{x_{GS}} (U_q - E_{GS} \cos \delta + (1+s)x_{GS}i_{GSd} - R_{GS}i_{GSq}). \end{aligned} \quad (2)$$

Уравнения (1) представляют собой традиционную форму записи уравнений Парка-Горва для синхронной машины (СМ), записанных во взаимной системе относительных величин, где напряжение возбуждения выражено в долях возбуждения холостого хода СМ, а время и постоянные времени представлены в секундах.

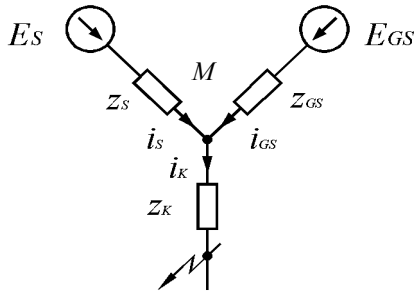


Рис. 1. Расчетная схема для определения тока КЗ в сложной схеме

Закономерность нарастания напряжения на обмотке возбуждения СМ под действием форсировки возбуждения может быть представлена экспонентой с постоянной времени T_e [4]:

$$U_{fi} = U_{f0} + (U_{fnp} - U_{f0})(1 - e^{-t/T_e}).$$

Предполагается, что до КЗ генератор работал в номинальном режиме, поэтому

$$U_{f0} = U_{fном} = E_{quом}; \quad U_{fnp} = k_{Uf} U_{fном}.$$

Здесь k_{Uf} – кратность предельного напряжения возбуждения. Сведения о значениях k_{Uf} , как и о значениях постоянной времени нарастания напряжения возбуждения при форсировке возбуждения T_e для различных типов турбогенераторов с определёнными системами возбуждения приведены, например в [3].

Дифференциальные уравнения (2) описывают эквивалентную систему [5].

Для решения системы уравнений (1) последняя дополняется системой алгебраических уравнений, связывающих потокосцепления с токами контуров:

$$\begin{aligned} \Psi_d &= x_d i_d + x_{ad} i_f + x_{ad} i_{1d}, \\ \Psi_q &= x_q i_q + x_{aq} i_{1q}, \\ \Psi_f &= x_{ad} i_d + x_f i_f + x_{ad} i_{1d}, \\ \Psi_{1d} &= x_{ad} i_d + x_{1d} i_{1d} + x_{ad} i_f, \\ \Psi_{1q} &= x_{aq} i_q + x_{1q} i_{1q}. \end{aligned} \quad (3)$$

Неизвестными переменными в правых частях ДУ остаются составляющие напряжения U_d, U_q в узле М, что требует записи соответствующих уравнений, связывающих эти неизвестные с переменными состояния системы рис. 1.

Если учесть, что потокосцепления воздушного зазора

$$\begin{aligned} \Psi_{\delta d} &= x_{ad} (i_d + i_f + i_{1d}), \\ \Psi_{\delta q} &= x_{aq} (i_q + i_{1q}), \end{aligned} \quad (4)$$

то систему (3) можно записать в виде

$$\begin{aligned} \Psi_d &= \Psi_{\delta d} + x_{\sigma} i_d, \\ \Psi_f &= \Psi_{\delta d} + x_{\sigma f} i_f, \\ \Psi_{1d} &= \Psi_{\delta d} + x_{\sigma 1d} i_{1d}, \\ \Psi_{1q} &= \Psi_{\delta q} + x_{\sigma 1q} i_{1q}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $x_{\sigma}, x_{\sigma f}, x_{\sigma 1d}, x_{\sigma 1q}$ – индуктивные сопротивления рассеяния соответствующих контуров, которые связаны с рассмотренными ранее параметрами следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} x_d &= x_{ad} + x_{\sigma}, \\ x_q &= x_{aq} + x_{\sigma}, \\ x_f &= x_{ad} + x_{\sigma f}, \\ x_{1d} &= x_{ad} + x_{\sigma 1d}, \\ x_{1q} &= x_{aq} + x_{\sigma 1q}. \end{aligned} \quad (6)$$

Если из системы (5) выразить токи и полученные выражения подставить в (4), получим

$$\begin{aligned} \frac{\Psi_{\delta d}}{x_{\delta d}} &= \frac{\Psi_d}{x_{\sigma}} + \frac{\Psi_f}{x_{\sigma f}} + \frac{\Psi_{1d}}{x_{\sigma 1d}}, \\ \frac{\Psi_{\delta q}}{x_{\delta q}} &= \frac{\Psi_q}{x_{\sigma}} + \frac{\Psi_{1q}}{x_{\sigma 1q}}, \end{aligned} \quad (7)$$

где

$$\begin{aligned} x_{\delta d} &= \left(\frac{1}{x_{\sigma}} + \frac{1}{x_{ad}} + \frac{1}{x_{\sigma f}} + \frac{1}{x_{\sigma 1d}} \right)^{-1}, \\ x_{\delta q} &= \left(\frac{1}{x_{\sigma}} + \frac{1}{x_{aq}} + \frac{1}{x_{\sigma 1q}} \right)^{-1}. \end{aligned} \quad (8)$$

Далее выполняется подстановка первых двух уравнений (5) в (7) с последующим исключением переменных $\Psi_{\delta d}, \Psi_{\delta q}$. Продифференцировав полученные выражения по времени с учётом зависимостей

$$\begin{aligned} \frac{x_{\sigma}^2}{x_{\sigma} - x_{\delta d}} &= x_{\sigma} + \left(\frac{1}{x_{ad}} + \frac{1}{x_{\sigma f}} + \frac{1}{x_{\sigma 1d}} \right)^{-1} = x_{\sigma}^*, \\ \frac{x_{\sigma}^2}{x_{\sigma} - x_{\delta q}} &= x_{\sigma} + \left(\frac{1}{x_{aq}} + \frac{1}{x_{\sigma 1q}} \right)^{-1} = x_{\sigma}^*, \\ \frac{x_{\sigma} x_{\delta d}}{x_{\sigma} - x_{\delta d}} &= \left(\frac{1}{x_{ad}} + \frac{1}{x_{\sigma f}} + \frac{1}{x_{\sigma 1d}} \right)^{-1} = x_{\sigma}^* - x_{\sigma}, \end{aligned} \quad (9)$$

можно прийти к уравнениям вида

$$\begin{aligned} \frac{d\Psi_d}{dt} &= x_{\sigma}^* \frac{di_d}{dt} - (x_{\sigma}^* - x_{\sigma}) \left(\frac{r_f i_f - U_{\beta}}{x_{\sigma f}} + \frac{r_{1d} i_{1d}}{x_{\sigma 1d}} \right) \omega_0, \\ \frac{d\Psi_q}{dt} &= x_{\sigma}^* \frac{di_q}{dt} - (x_{\sigma}^* - x_{\sigma}) \frac{r_{1q} i_{1q}}{x_{\sigma 1q}} \omega_0. \end{aligned} \quad (10)$$

Подставив полученные выражения в первые два уравнения системы (1), получим:

$$\begin{aligned} \frac{di_d}{dt} &= \frac{\omega_0}{x_{\sigma}^*} \left(U_d + (x_{\sigma}^* - x_{\sigma}) \left(\frac{r_f i_f - U_{\beta}}{x_{\sigma f}} + \frac{r_{1d} i_{1d}}{x_{\sigma 1d}} \right) - (1+s)\Psi_q - r_s i_d \right), \\ \frac{di_q}{dt} &= \frac{\omega_0}{x_{\sigma}^*} \left(U_q + (x_{\sigma}^* - x_{\sigma}) \frac{r_{1q} i_{1q}}{x_{\sigma 1q}} + (1+s)\Psi_q - r_s i_d \right). \end{aligned} \quad (11)$$

Производные составляющих тока в ветви шунта можно записать так:

$$\begin{aligned} \frac{di_{kd}}{dt} &= \frac{\omega_0}{x_k} (U_d - (1+s)x_k i_{kq} - R_k i_{kd}), \\ \frac{di_{kq}}{dt} &= \frac{\omega_0}{x_k} (U_q + (1+s)x_k i_{kd} - R_k i_{kq}). \end{aligned} \quad (12)$$

Согласно первому закону Кирхгофа (в том числе и в дифференциальной форме) для узла М [6]

$$\begin{aligned} i_{kd} &= i_d + i_{GSd}, \quad i_{kq} = i_q + i_{GSq}, \\ \frac{di_{kd}}{dt} &= \frac{di_d}{dt} + \frac{di_{GSd}}{dt}, \quad \frac{di_{kq}}{dt} = \frac{di_q}{dt} + \frac{di_{GSq}}{dt}. \end{aligned} \quad (13)$$

С учётом (13) из соотношений (3), (11), (12) можно выразить неизвестные U_d, U_q .

$$\begin{aligned} U_d &= \frac{e_d x_{GS} x_k + x_d (e_{kd} x_{GS} + e_{GSd} x_k)}{x_{GS} x_k + x_d (x_{GS} + x_k)}, \\ U_q &= \frac{e_q x_{GS} x_k + x_q (e_{kq} x_{GS} + e_{GSq} x_k)}{x_{GS} x_k + x_q (x_{GS} + x_k)}, \end{aligned} \quad (14)$$

где

$$\begin{aligned} e_d &= (x_d^* - x_\sigma) \left(\frac{r_f i_f - U_f}{x_{\sigma f}} + \frac{n_d i_{fd}}{x_{\sigma 1d}} \right) - (1+s) \Psi_q - r_i i_d, \\ e_q &= (x_q^* - x_\sigma) \left(\frac{n_q i_{fq}}{x_{\sigma 1q}} \right) - (1+s) \Psi_d - r_i i_q, \\ e_{GSd} &= -E_{GS} \sin \delta + (1+s) x_{GS} i_{GSq} + R_{GS} i_{GSd}, \\ e_{GSq} &= E_{GS} \cos \delta - (1+s) x_{GS} i_{GSd} + R_{GS} i_{GSq}, \\ e_{kd} &= (1+s) x_k i_{kq} + R_k i_{kd}, \\ e_{kq} &= (1+s) x_k i_{kd} + R_k i_{kq}. \end{aligned} \quad (15)$$

Таким образом, система ДУ (1), (2), а также дополняющая их система алгебраических уравнений (3), (14) полностью описывают исследуемую систему и позволяют применить для решения любой метод численного интегрирования.

Выделение периодической и аperiodической составляющих из кривой изменения модуля обобщённого тока статора. Выделение периодической и аperiodической составляющих из кривой изменения модуля обобщённого тока статора можно выполнить с помощью кубической сплайн аппроксимации [7; 11].

Для построения огибающих кривой в качестве узлов аппроксимации используются локальные экстремумы: верхней ($f_B(t)$) – локальные максимумы, нижней ($f_H(t)$) – локальные минимумы. Для каждого интервала $[t_i + t_{i+1}]$ изменения времени между экстремумами сплайн функция записывается в виде

$$\begin{aligned} f(t) &= \frac{1}{6h_i} (m_i (t_{i+1} - t)^3 + m_{i+1} (t - t_i)^3) + \\ &+ \frac{1}{h_i} \left[\left(y_i - \frac{m_i h_i^2}{6} \right) (t_{i+1} - t) + \left(y_{i+1} - \frac{m_{i+1} h_i^2}{6} \right) (t - t_{i+1}) \right], \end{aligned} \quad (16)$$

где $h = x_{i+1} - x_i$, $m_i = f''(x_i)$, $i = 1, 2, \dots, n$ (n – число узлов).

Если $t < t_1$, выполняется линейная экстраполяция по формуле

$$f(t) = f(x_1) - \left((t_2 - t_1) \frac{m_2}{6} + \frac{(f(x_2) - f(x_1))}{(t_2 - t_1)} \right) (t - t_1), \quad (17)$$

а при $t > t_n$ – по формуле

$$f(t) = f(x_n) + \left((t_n - t_{n-1}) \frac{m_{n-1}}{6} + \frac{f(x_n) - f(x_{n-1})}{t_n - t_{n-1}} \right) (t - t_n). \quad (18)$$

$$\begin{aligned} h_i m_i + 2(h_i + h_{i+1}) m_{i+1} + h_{i+1} m_{i+2} = \\ = 6 \left(\frac{f(x_{i+2}) - f(x_{i+1})}{h_{i+1}} + \frac{f(x_{i+1}) - f(x_i)}{h_i} \right) \end{aligned} \quad (19)$$

размерностью $(n - 2)$. Значения m_1, m_n заданы равными нулю.

Значения периодической составляющей в момент времени t можно определить по формуле

$$I_n(t) = \frac{f_B(t) + f_H(t)}{2}, \quad (20)$$

аperiodической

$$i_a(t) = f_B(t) - I_n(t). \quad (21)$$

Результаты расчётов. На рисунках 2 и 3 приведены кривые изменения модуля изображающего вектора тока трёхфазного короткого замыкания i_k в системе координат d, q ротора СМ.

Для рассматриваемой расчетной схемы (рис. 1), выделенных указанным выше способом периодической I_n и аperiodической i_a составляющих тока в месте КЗ, а также угла δ между поперечной осью ротора генератора и вектором ЭДС системы, выраженного в радианах.

Периодическая составляющая тока I_n представлена в системе координат d, q ротора СМ и может рассматриваться как кривая изменения её действующего значения в относительных единицах при $I_\sigma = S_\sigma / \sqrt{3} \cdot U_\sigma$. В качестве базисных величин взяты номинальные условия СМ. Аperiodическая составляющая i_a тока в месте КЗ после выделения представляется в неподвижной системе координат в относительных единицах при $i_\sigma = \sqrt{2} \cdot I_\sigma$.

Кривые получены в результате моделирования при следующих исходных данных: турбогенератор ТГВ-200М, $P_{\text{ном}} = 200$ МВт, $U_{\text{ном}} = 15,75$ кВ; $\cos \phi_{\text{ном}} = 0,85$; $x_d'' = 0,204$; $x_d' = 0,31$; $x_d = 1,86$; $x_q'' = 0,215$; $x_\sigma = 0,167$; $x_2 = 0,249$; $E_{q\text{ном}} = 2,53$; $T_a = 0,4$ с; $K_{Uf} = 2$; $T_e = 0,02$ с; $T_J = 6,8$ с; $J_\Sigma = 60$ тм²; до КЗ генератор работает в номинальном режиме с номинальным напряжением на выводах, с номинальной нагрузкой и коэффициентом мощности; система $E_c = 0,911$; $z_c = 0,025 + j0,2$; общая ветвь $z_k = 0,001 + j0,05$.

Аналогичные расчёты проведены для турбогенератора ТВФ-63-2 (рис. 3), $P_{\text{ном}} = 63$ МВт, $U_{\text{ном}} = 10,5$ кВ; $\cos \phi_{\text{ном}} = 0,8$; $x_d'' = 0,139$; $x_d' = 0,224$; $x_d = 2,2$; $x_q'' = 0,143$; $x_\sigma = 0,121$; $x_2 = 0,22$; $T_a = 0,24$ с; $K_{Uf} = 2$; $T_e = 0,2$ с; $T_J = 6,09$ с; $J_\Sigma = 19,4$ тм²; $E_c = 0,929$; $z_c = 0,025 + j0,684$; $z_k = 0,001 + j0,05$

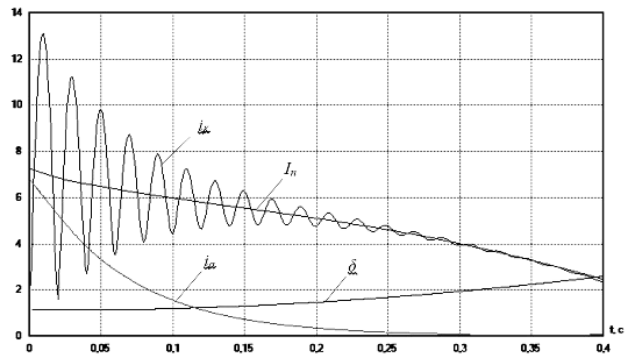


Рис. 2. Кривые изменения параметров режима короткого замыкания для генератора ТГВ–200М

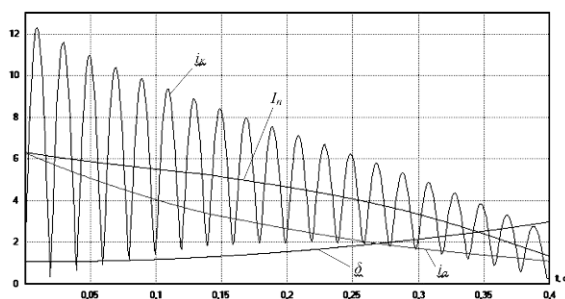


Рис. 3. Кривые изменения параметров режима короткого замыкания для генератора ТГВ-63М

Заключение

1. Представление элементов исследуемой системы в единой системе координат d, q позволило избавиться от переменных коэффициентов, необходимых для перехода от одной системы к другой, а также аналитически выразить значения составляющих напряжения в общем узле. Данные особенности значительно повышают устойчивость численного решения системы ДУ, что особенно важно при моделировании сильных возмущений в системе, которыми, в частности, являются внезапные короткие замыкания.

2. Сплайн-аппроксимация позволяет достаточно просто выделить из кривой изменения модуля обобщенного тока статора периодическую и аperiodическую составляющие, которые необходимы для выбора и проверки выключателей.

Список использованной литературы

1. ГОСТ 687-78. Выключатели переменного тока на напряжение свыше 1000 В. Общие технические условия. М.: Издательство стандартов, 1994 – 107 с.
2. ГОСТ Р 52735 – 2007. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением свыше 1 кВ. М.: Стандартинформ, 2007.
3. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования РД 153-34.0-20.527-98: под ред. Б. Н. Неклепаева. – М.: ЭНАС, 2008. – 114 с.
4. Ульянов С. А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах / С. А. Ульянов – М.: Энергия, 1970. – 518 с.
5. Голов П. В. Система математических моделей для расчета переходных процессов в сложных электроэнергетических системах / П. В. Голов, Ю. В. Шаров, В. А. Строев // *Электричество*, М.: – 2007, № 5. – 2 с.
6. Сивокобиленко В. Ф. Математичне моделювання в електротехніці і енергетиці: навч. посібник / В. Ф. Сивокобиленко – Донецьк: РВА ДонНТУ, 2005. – 350 с.
7. Математичне моделювання в електроенергетиці: підручник Кириленко О. В., Сегеда М. С., Буткевич О. Ф., Мазур Т. А. – Львів: Вид. «Львівська політехніка», 2010. – 608 с.
8. Переходные процессы в электроэнергетических системах: учебник для вузов / И. П. Крючков, В. А. Старшинов, Ю. П. Гусев, М. В. Пираторов: под

ред. И. П. Крюčkова. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008 – 416 с.

9. Короткие замыкания и выбор электрооборудования: под ред. И. П. Крюčkова, В. А. Старшинова. – М.: Издательский дом МЭИ, 2012. – 568 с.

10. Бесараб А. Н. Расчет периодической составляющей тока трехфазного короткого замыкания в сложных схемах в произвольный момент времени / А. Н. Бесараб, В. Н. Невольниченко, М. Ю. Шабовта // *Электротехнические и компьютерные системы*. – К.: Техника – 2014. – Вып. 15(91). – С. 407 – 411.

11. Дьяконов В. П. Справочник по алгоритмам и программам и программированию на языке бейсик для персональных ЭВМ: справочник / В. П. Дьяконов – М.: Наука. Гл. ред. Физ. мат. лит., 1989. – 240 с.

Получено 18.05.2015

References

1. GOST 687-78. Vyklyuchateli peremennogo toka na naprjazhenie svyshe 1000 V. Obshhie tehicheskie uslovija, [A.C. Circuit-breakers for Voltages Exceeding 1000 V General Specifications], (1994), *Izdatel'stvo Standartov Publ.*, Moscow, Russian Federation, 107 p. (In Russian).
2. GOST R 52735 – 2007. Korotkie zamykanija v jelektrostanovkah. Metody rascheta v jelektrostanovkah peremennogo toka naprjazheniem svyshe 1 kV, [Short Circuits in Electroinstallations. Calculation Methods in Electroinstallations of Alternating Current over 1 kV], (2007) *Standartinform Publ.*, Moscow, Russian Federation (In Russian).
3. Rukovodjashhie ukazanija po raschetu tokov korotkogo zamykanija i vyboru jelektrooborudovanija RD 153-34.0-20.527-98, [Guidelines on Calculation of Short Currents and Choice of Electric Equipment], (2008), *JeNAS Publ.*, Moscow, Russian Federation, 114 p. (In Russian).
4. Ul'janov S.A. Jelektromagnitnye perehodnye processy v jelektricheskikh sistemah, [Electromagnetic Transition Processes in Electric Systems], (1970), Moscow, Russian Federation, 518 p. (In Russian).
5. Golov P.V., Sharov Ju.V., and Stroeв V.A. Sistema matemaicheskikh modelej dlja rascheta perehodnyh processov v slozhnyh jelektrojenergeticheskikh sistemah, [System the Matemaicheskikh of Models for Calculation of Transition Processes in Difficult Electrical Power Systems], (2007), Moscow, Russian Federation, *Electricity Publ.*, Vol. 5, 2 p. (In Russian).
6. Sivokobilenko V.F., *Matematicheskoe modelirovanie v jelektrotehnikе i jenergetike* [Mathematical Modeling in the Electrician and the Power Engineering Specialist], (2005), Donec'k, Ukraine, *DonNTU Publ.*, 350 p. (In Ukrainian).
7. Kirilenko O.V., Segeda M.S., Butkevich O.F., and Mazur T.A., *Matematichne modeljuvannja v elektroenergetici*, [Mathematical Modeling in Power Industry], (2010), *L'viv's'ka Politehnika Publ.*, L'viv, Ukraine, 608 p. (In Ukrainian).
8. Krjuchkov I.P., Starshinov V.A., Gusev Ju.P, and Piratorov M.V., *Perehodnye processy v jelektrojenerget-*

ических системах [Transition Processes in Electrical Power Systems], (2008), *Izdatel'skij dom MJeI Publ.*, Moscow, Russian Federation, 416 p. (In Russian).

9. Krjuchkova I.P., and Starshinova V.A., *Korotkie замыкания i vybor jelektrooboru-dovaniya*, [Short Circuits and Choice of Electric Equipment], (2012), *Izdatel'skij dom MJeI Publ.*, Moscow, Russian Federation, 568 p. (In Russian).

10. Besarab A.N., Nevol'nichenko V.N., Shabovta M. Y., *Raschet periodicheskoj sostavljajushhej toka trehfaznogo korotkogo замыкания v slozhnyh shemah v proizvol'nyj moment vremeni*, [Calculation of a Periodic Component of Current of Three-phase Short Circuit in Difficult Schemes in any Timepoint], (2014), *Elektrotehnicheskie i Komp'juternye Sistemy*, *Tehnika Publ.*, Kiev, Ukraine, Vol. 15(91), pp. 407 – 411 (In Russian).

11. D'jakonov V.P. *Spravochnik po algoritmam i programmam i programmirovaniyu na jazyke bejsik dlja personal'nyh JeVM*, [The Reference Book on Algorithms and Programs and Programming in Language a Basic for Personal Computers], (1989), *Nauka Publ.*, Moscow, Russian Federation, 240 p. (In Russian).



Бесараб
Александр Николаевич,
к.т.н., доц. каф. электро-
снабжения и энергетического
менеджмента Одесского нац.
политехнического ун-та,
тел.: (048) 705-85-67.
E-mail: al_besarab@ukr.net



Невольниченко
Валентин Николаевич,
к.т.н., доц. каф. электроснабже-
ния и энергетического менедж-
мента Одесского нац. политех-
нического ун-та,
тел.: (048) 705-85-48.
E-mail: vn_n@ukr.net



Шабовта
Михаил Юрьевич,
к.т.н., доц. каф. электроснабже-
ния и энергетического менедж-
мента Одесского нац. политех-
нического ун-та,
тел.: (048) 705-85-67.
E-mail: poststudent@ukr.net