

УДК 621.313.018.24

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

РАСЧЕТ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ТОКА ТРЕХФАЗНОГО КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В СЛОЖНЫХ СХЕМАХ В ПРОИЗВОЛЬНЫЙ МОМЕНТ ВРЕМЕНИ

Аннотация. Предложены математические модели сложной системы электроснабжения, расчетная схема которой превращается в трехлучевую звезду ветвей генератора (или синхронного либо асинхронного двигателя) с сопротивлением, по которой протекает ток короткого замыкания от всех источников. Модели используются для массовых инженерных расчетов периодической составляющей тока трехфазного короткого замыкания в произвольный момент времени.

Ключевые слова: математическая модель, электромеханический переходный процесс, синхронные машины, изображающий вектор, ток короткого замыкания, потокосцепления, система координат

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

THE PERIODIC COMPONENT OF THE CURRENT THREE-PHASE SHORT CIRCUIT CALCULATION IN THE COMPLEX SCHEMES AT AN ARBITRARY TIME

Abstract. The proposed mathematical model of a complex electrical system, the design scheme which turns into a three-beam star branches generator (or motor, synchronous or asynchronous), and overall system branches to the resistance, which occurs on the fault current from all sources. Models are used for engineering calculations periodic mass component of the current three-phase fault for arbitrary time by highlighting it with the curve changes module fine current vector in the calculation of electromechanical fault transient.

Keywords: mathematical model of electromechanical transient synchronous machines, graphic vector, short-circuit current, flux coordinate system

О. М. Бесараб, В. М. Невольниченко, М. Ю. Шабовта, кандидаты техн. наук

РОЗРАХУНОК ПЕРІОДИЧНОЇ СКЛАДОВОЇ СТРУМУ ТРИФАЗНОГО КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ В СКЛАДНИХ СХЕМАХ В ДОВІЛЬНИЙ МОМЕНТ ЧАСУ

Анотація. Запропоновані математичні моделі складної системи електропостачання, розрахункова схема якої перетворюється в трипроменеву зірку гілок генератора (або синхронного або асинхронного двигуна), з опором, по якій протікає струм короткого замикання від усіх джерел. Моделі використовуються для масових інженерних розрахунків періодичної складової струму трифазного короткого замикання в довільний момент часу.

Ключові слова: математична модель, електромеханічний перехідний процес, синхронні машини, зображуючий вектор, струм короткого замикання, потокозчеплення, система координат

Введение. Согласно [1] в сложных схемах электроустановок переменного тока напряжением свыше 1 кВ с несколькими источниками энергии, связанными с точкой повреждения через какой-либо общий элемент (трансформатор, реактор, линию электропередачи), действующее значение периодической составляющей тока трехфазного короткого замыкания (КЗ) в произвольный момент времени следует рассчитывать путем решения соответствующей системы дифференциальных уравнений переходных процессов с использованием ПК. Достаточная точность расчетов может быть обеспечена при использовании «полных» систем дифференциальных уравнений, описывающих электромеханические процессы в электрических машинах (для синхронных машин – уравнений Парка–Горева), учете влияния форсировки возбуждения, изменения скорости вращения электрических машин, действия регуляторов скорости турбин. Система дифференциальных уравнений оказывается сложной, поэтому, прежде всего, возникает вопрос о выборе расчетной схемы, для которой она должна быть составлена. При проведении массовых инженерных

расчетов токов КЗ для выбора выключателей по коммутационной способности [2; 4] любая сколь угодно сложная схема может быть преобразована в трехлучевую звезду так, чтобы ближайший к месту короткого замыкания генератор (или двигатель) и последовательно соединенные с ним элементы были представлены в виде отдельной ветви. Более удаленные источники энергии и связывающие их линии электропередачи, трансформаторы вместе с остальной частью электроэнергетической системы были представлены в другой ветви – ветви системы неизменной по амплитуде эквивалентной ЭДС и эквивалентным сопротивлением (рис. 1). В третью ветвь включается сопротивление элемента, который при коротком замыкании «связывает» две указанные выше ветви с точкой короткого замыкания. Такая схема аналогична расчетной схеме, используемой в методе типовых кривых [3 – 4].

Математическая модель анализа переходных процессов при записи уравнений элементов в системах координат d, q и α, β .

Математическая модель анализа переходных процессов в расчетной схеме рис. 1 состоит из модели синхронной (асинхронной) машины (СМ, АМ) с учетом

© Бесараб А.Н., Невольниченко В.Н., Шабовта М.Ю., 2014

последовательно соединенных элементов до узла М и моделей двух других ветвей. При этом уравнения СМ записываются в системе вращающихся со скоростью ротора координат d, q, θ , уравнения АД, системы и уравнения элементов электрической сети целесообразно записывать в неподвижной системе координат α, β, θ .

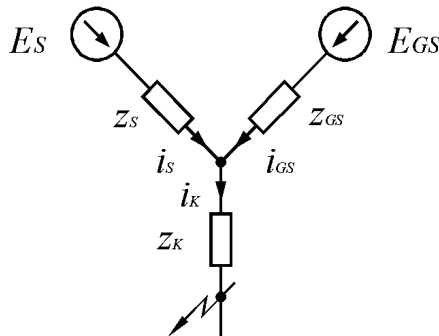


Рис. 1. Расчетная схема для определения действующего значения периодической составляющей тока КЗ в сложной схеме

Существуют различные формы записи системы уравнений для анализа переходных процессов в расчетной схеме рис. 1, которые позволяют избежать численного дифференцирования при решении этих уравнений. Представляется целесообразным для ветви с синхронным генератором или двигателем, близким к месту КЗ, использовать систему уравнений Парка – Горева, которая при записи уравнений во взаимной системе относительных единиц в нормальной форме Коши имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{d\Psi_d}{dt} &= (-U_d - \omega_r \Psi_q - r_s i_d) \omega_0, \\ \frac{d\Psi_q}{dt} &= (-U_q + \omega_r \Psi_d - r_s i_q) \omega_0, \\ \frac{d\Psi_f}{dt} &= \left(\frac{U_f^* r_f}{x_{ad}} - r_f i_f \right) \omega_0, \\ \frac{d\Psi_{1d}}{dt} &= -\omega_0 r_{1d} i_{1d}, \\ \frac{d\Psi_{1q}}{dt} &= -\omega_0 r_{1q} i_{1q}, \\ \frac{d\omega_r}{dt} &= \frac{(M_{\text{мех}} - \Psi_d i_q + \Psi_q i_d)}{T_j}, \\ \frac{d\gamma}{dt} &= \omega_r \omega_0. \end{aligned} \quad (1)$$

В уравнениях принято, что ось d опережает ось q , все величины выражены в относительных единицах за исключением времени и постоянных времени, которые выражены в секундах. Обозначения всех величин такие же, как в [3].

Составляющие напряжения узла M в системе координат α, β, θ могут быть найдены согласно закону Ома для ветви системы рис. 1 как

$$U_{y(\alpha,\beta)} = E_{c(\alpha,\beta)} - r_{GS} i_{GS(\alpha,\beta)} - \frac{x_{GS}}{\omega_0} \frac{di_{GS(\alpha,\beta)}}{dt}$$

Из этого выражения получим дифференциальные уравнения для определения составляющих токов в ветви системы, дополняющие систему дифференциальных уравнений (1) Парка-Горева для ветви с генератором:

$$\begin{aligned} \frac{di_{GS\alpha}}{dt} &= (E_{GS\alpha} - r_{GS} i_{GS\alpha} - U_{y\alpha}) \frac{\omega_0}{x_{GS}}, \\ \frac{di_{GS\beta}}{dt} &= (E_{GS\beta} - r_{GS} i_{GS\beta} - U_{y\beta}) \frac{\omega_0}{x_{GS}}. \end{aligned} \quad (2)$$

Система дифференциальных уравнений (1) дополняется системой алгебраических уравнений, устанавливающих связь между потокосцеплениями и токами контуров статора и ротора генератора, которая с учётом того, что в относительных единицах значения индуктивностей и индуктивных сопротивлений одинаковы, имеет вид:

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

где x_d, x_q – синхронные индуктивные сопротивления по продольной и поперечной осям; x_{ad}, x_{aq} – индуктивные сопротивления реакции статора по продольной и поперечной осям; x_{ff}, x_{1d}, x_{1q} – индуктивные сопротивления обмотки возбуждения, демпферных обмоток по продольной и поперечной оси

Система алгебраических уравнений (3) используется для расчета правых частей дифференциальных уравнений Парка-Горева перед их интегрированием. Для повышения точности и устойчивости решений при численном интегрировании этих дифференциальных уравнений алгебраические уравнения следует решать в приводимом ниже порядке.

Вначале следует определить продольную и поперечную составляющие потокосцепления воздушного зазора:

$$\Psi_{\delta d} = \left(\frac{\Psi_d}{x_{\sigma} + x_{\text{внешн}}} + \frac{\Psi_f}{x_{\sigma f}} + \frac{\Psi_{1d}}{x_{\sigma 1d}} \right) \cdot A, \quad (4)$$

$$\text{где } A = \frac{1}{\frac{1}{x_{\sigma} + x_{\text{внешн}}} + \frac{1}{x_{\sigma f}} + \frac{1}{x_{\sigma 1d}} + \frac{1}{x_{ad}}}$$

Аналогично

$$\Psi_{\delta q} = \left(\frac{\Psi_q}{x_{\sigma} + x_{\text{внешн}}} + \frac{\Psi_{1q}}{x_{\sigma 1q}} \right) \cdot B, \quad (5)$$

где
$$B = \frac{1}{\frac{1}{x_\sigma + x_{внешн.}} + \frac{1}{x_{\sigma 1q}} + \frac{1}{x_{\alpha q}}}$$

Далее рассчитываются токи всех контуров:

$$i_d = \frac{\Psi_d - \Psi_{\delta d}}{x_G + x_\sigma}, i_q = \frac{\Psi_q - \Psi_{\delta q}}{x_G + x_\sigma}, i_f = \frac{\Psi_f - \Psi_{\delta f}}{x_{\sigma f}},$$

$$i_{1d} = \frac{\Psi_{1d} - \Psi_{\delta d}}{x_{\sigma 1d}}, i_{1q} = \frac{\Psi_{1q} - \Psi_{\delta q}}{x_{\sigma 1q}}.$$

Найденные по этим выражениям токи позволяют рассчитать правые части системы дифференциальных уравнений (1).

Продифференцировав выражения для токов i_d, i_q при условии, что $x_\sigma = const$, получим выражения для их производных:

$$\frac{di_d}{dt} = \frac{d\Psi_d - d\Psi_{\delta d}}{dt} \frac{1}{x_G + x_\sigma},$$

$$\frac{di_q}{dt} = \frac{d\Psi_q - d\Psi_{\delta q}}{dt} \frac{1}{x_G + x_\sigma}. \quad (6)$$

Производные $\frac{d\Psi_d}{dt}$ и $\frac{d\Psi_q}{dt}$ в выражениях (6) известны из первых двух уравнения системы (1). Производные потокоцеплений $\psi_{\delta d}$ и $\psi_{\delta q}$ находятся дифференцированием выражений (4) и (5) при условии, что все $x_i = const$:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\psi_{\delta d}}{dt} &= \left(\frac{d\psi_d}{dt} \frac{1}{x_\sigma + x_G} + \frac{d\psi_f}{dt} \frac{1}{x_{\sigma f}} + \frac{d\psi_{1d}}{dt} \frac{1}{x_{\sigma 1d}} \right) \cdot A, \\ \frac{d\psi_{\delta q}}{dt} &= \left(\frac{d\psi_q}{dt} \frac{1}{x_\sigma + x_G} + \frac{d\psi_{1q}}{dt} \frac{1}{x_{\sigma 1q}} \right) \cdot B. \end{aligned} \right\}$$

Токи СГ и их производные определяются в системе координат d, q, θ . Для того чтобы их использовать в уравнениях связи, перейдем к неподвижной системе координат α, β, θ с помощью соотношений

$$i_\alpha(t)_i = i_q(t)_i \cos(\gamma(t)) - i_d(t)_i \sin(\gamma(t)),$$

$$i_\beta(t)_i = i_q(t)_i \sin(\gamma(t)) + i_d(t)_i \cos(\gamma(t)).$$

Соответственно

$$\frac{di_\beta(t)_i}{dt} = \frac{di_q(t)_i}{dt} \sin(\gamma(t)_i) + i_q \omega_r(t)_i \cos(\gamma(t)_i) +$$

$$+ \frac{di_d(t)_i}{dt} \cos(\gamma(t)_i) - i_d(t)_i \omega_r(t)_i \sin(\gamma(t)_i),$$

$$\frac{di_\alpha(t)_i}{dt} = \frac{di_q(t)_i}{dt} \cos(\gamma(t)_i) - i_q(t)_i \omega_r(t)_i \sin(\gamma(t)_i) -$$

$$- \frac{di_d(t)_i}{dt} \sin(\gamma(t)_i) - i_d \omega_r(t)_i \cos(\gamma(t)_i),$$

Токи и их производные в ветви с сопротивлением x_k рис. 1 определяются по первому закону Кирхгофа в системе координат α, β, θ как сумма токов и их производных ветвей системы и генератора:

$$i_{k\alpha} = i_{GS\alpha} + i_\alpha, \quad i_{k\beta} = i_{GS\beta} + i_\beta,$$

$$\frac{di_{k\alpha}}{dt} = \frac{di_{GS\alpha}}{dt} + \frac{di_\alpha}{dt}, \quad \frac{di_{k\beta}}{dt} = \frac{di_{GS\beta}}{dt} + \frac{di_\beta}{dt}.$$

Напряжение в узле M можно определить, как падение напряжения в ветви с сопротивлением x_k

$$U_{y\alpha} = r i_{k\alpha} + \frac{x_k}{\omega_0} \frac{di_{k\alpha}}{dt},$$

$$U_{y\beta} = r i_{k\beta} + \frac{x_k}{\omega_0} \frac{di_{k\beta}}{dt}$$

В правых частях первых двух уравнений (1) составляющие напряжения статора должны быть записаны в системе координат d, q, θ генератора:

$$U_d(t)_i = U_{y\beta}(t)_i \cos(\gamma) - U_{y\alpha}(t)_i \sin(\gamma),$$

$$U_q(t)_i = U_{y\beta}(t)_i \sin(\gamma) + U_{y\alpha}(t)_i \cos(\gamma).$$

В результате получаем замкнутую систему уравнений, с помощью которой можно рассчитать режим КЗ и найти действующее значение периодической составляющей тока КЗ для произвольного момента времени, путем выделения её из кривой изменения модуля изображающего вектора тока в месте КЗ (в ветви с x_k).

Расчёты. На рис. 2 приведены кривые изменения модулей изображающих векторов токов в ветвях расчетной схемы рис. 1 и угла δ между поперечной осью генератора и вектором ЭДС системы при трехфазном коротком замыкании за сопротивлением z_k . Полученные в результате моделирования при следующих исходных данных: турбогенератор ТГВ – 200 М; $P_{ном} = 200$ МВт; $U_{ном} = 15,75$ кВ; $\cos\varphi_{ном} = 0,85$; $x''_d = 0,204$; $x'_d = 0,31$; $x_d = 1,86$; $x''_q = 0,215$; $x_\sigma = 0,167$; $x_2 = 0,249$; $T_a = 0,4$ с; $T_{f0} = 6,8$ с; $J_\Sigma = 60$ тм²; до КЗ он работает в номинальном режиме с номинальным напряжением на выводах, с номинальной нагрузкой и коэффициентом мощности; система $E_c = 0,85$; $z_c = 0,025 + j 0,5$; общая ветвь $z_k = 0,00105 + j 0,0503$.

Как видно из данных рис. 2 угол δ между ЭДС генератора и системы за время меньше 0,4 с и достигает 180 градусов.

На рис. 3 приведена кривая изменения модуля изображающего вектора тока i_k в общей ветви с z_k , а также кривая изменения действующего значения периодической составляющей тока КЗ I_{kt} , полученная в результате её выделения.

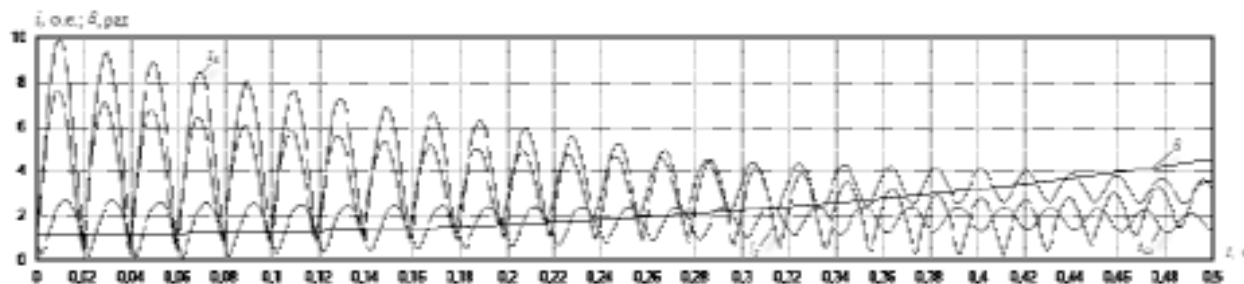


Рис. 2. Кривые изменения модулей изображающих векторов токов и угла δ

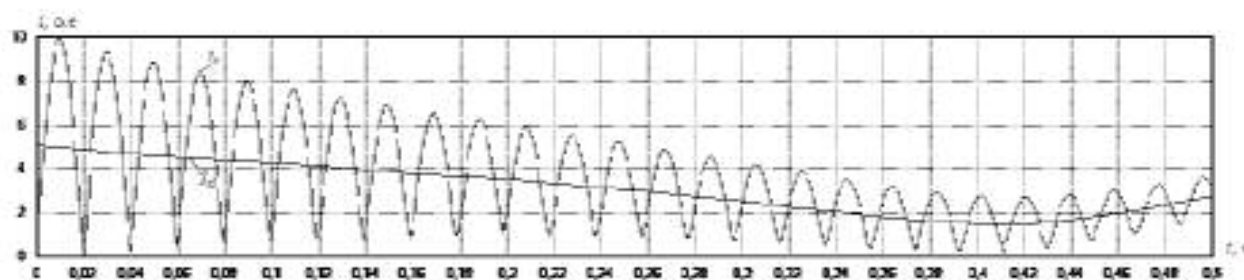


Рис. 3. Выделение периодической составляющей тока К3

Заключение. Предложенные математические модели сложной системы электроснабжения позволяют относительно просто рассчитывать электромеханический переходный процесс для определения составляющих и полного тока короткого замыкания при выборе электрических аппаратов и проводников, а также уставок устройств релейной защиты при достижении требуемой точности.

Список использованной литературы

1. Лоханин Е. К. Ещё раз о математическом моделировании синхронных и асинхронизированных машин при анализе процессов в энергосистемах / Е. К. Лоханин, Л. Г. Мамиконянц // *Электричество*. – № 2/2000. – С. 14 – 22.
2. 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. – № 5/2007. – С. 2 – 11.
3. Сивокобыленко В. Ф. Математическое моделирование электромеханических переходных процессов на электрических станциях / В. Ф. Сивокобыленко, М. А. Меженкова // *Электричество*. – М. : – 2001. – № 4/2001. – С. 5 – 9.
4. Национальный стандарт Российской Федерации. ГОСТ Р 52735 – 2007. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением свыше 1 кВ. – М. : Стандартинформ, 2007.
5. Стандарт организации ОАО «ФСК ЕЭС». Выключатели переменного тока на напряжение от 3 до 1150 кВ. СТО 56947007-29.130.10.095-2011.

6. Крючков И. П. Переходные процессы в электроэнергетических системах: учебник для вузов / И. П. Крючков, В. А. Старшинов, Гусев Ю. П., Пираторов М. В.: под ред. И. П. Крюčkова. – М. : Издательский дом МЭИ, 2008. – 416 с.

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

8. Шабовта М. Ю. Математическая модель для расчёта переходных режимов в многомашинной системе промышленного предприятия / М. Ю. Шабовта // *Електротехнічні та комп'ютерні системи*. – К. : Техніка. – № 02(78). – 2011. – С. 62 – 67.

9. Неклепаева Б. Н. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования РД 153-34.0-20.527-98: под ред. Б. Н. Неклепаева. – М. : Изд-во НИЦ ЭНАС, 2002. – 152 с.

10. Правила устройства электроустановок. – Харьков : Изд-во Форт, 2009. – 699 с.

Получено 04.07.2014

References

1. Lohanin E.K., and Mamikonjanc L.G. Eshhjo raz o ma-tematicheskom modelirovanii sinhronnyh i asinhronizirovannyh mashin pri analize processov v jenergosistemah [Once Again on the Mathematical Modeling of Synchronous Machines and in the Analysis of Asynchronous Processes in Power], (2000), Moscow, Russian Federation, *Electrichestvo*, Vol. 2/2000, pp. 14 – 22 (In Russian).
2. Golov P.V., Sharov Ju.V., and Stroeв V.A. Sistema matemaicheskikh modelej dlja rascheta perehodnyh

processov v slozhnyh jelektroenergeticheskikh sistema [System of Mathematical Models for the Calculation of Transients in Complex Power Systems], (2007), Moscow, Russian Federation, *Electrichestvo*, Vol. 5/2007, pp. 2 – 11 (In Russian).

3. Sivokobylenko V.F., and Mezhenkova M.A. Matematicheskoe modelirovanie jelektromehaniicheskikh perehodnykh processov na jelektricheskikh stancijah [Mathematical Modeling of Electromechanical Transients on Power Plants], (2001), Moscow, Russian Federation, *Electrichestvo*, Vol. 4/2001, pp. 5 – 9 (In Russian).

4. Nacional'nyj standart Rossijskoj Federacii. GOST R 52735 – 2007. Korotkie zamykaniya v jelektroustanovkah. Metody rascheta v jelektroustanovkah peremennogo toka naprjazheniem svyshe 1 kV [National Standard of the Russian Federation. GOST R 52735 – 2007. Short Circuits in Electrical Installations. Methods of Calculation in Electric appli-tems AC Voltages above 1 kV], (2007), Moscow, Russian Federation, *Standartinform* (In Russian).

5. Standart organizacii OAO “FSK EJeS”. Vyklyuchately peremennogo toka na naprjazhenie ot 3 do 1150 kV [The Standard of OAO “UES FGC”. Switches AC Voltage from 3 to 1150 kW], (2011), STO 56947007-29.130.10.095-2011, Moscow, Russian Federation.

6. Kryuchkov I.P., Starshinov V.A., Gusev Yu.P., and Piratorov M.V. Perekhodnye protsessy v elektroenergeticheskikh sistemakh: uchebnik dlya vuzov: pod red. I.P.Kryuchkova [Transients in Power Systems], (2008), Moscow, Russian Federation, *Izdatel'skij Dom MJeI* (In Russian).

7. Kryuchkova I.P. Korotkie zamykaniya i vybor elektrooborudovaniya: pod red. I.P. Kryuchkova, V.A. Starshinova. Korotkie zamykaniya i vybor jelektrooborudovaniya [Short Circuit and Selection of Electrical Equipment], (2012), Moscow, Russian Federation, *Izdatel'skij Dom MJeI* (In Russian).

8. Shabovta M.Ju. Matematicheskaja model' dlja raschjota perehodnykh rezhimov v mnogomashinnoj sisteme promyshlennogo predpriyatija [A Mathematical model for Calculating Transients in multi-machine System of Industrial Enterprises], (2011), Odessa, Ukraine, *Elektrotehnikni and Komp'juterni Sistemi, Technica*, No. 02(78), pp. 62 – 67 (In Russian).

9. Neklpaeva B.N. Rukovodyashchie ukazaniya po raschetu tokov korotkogo zamykaniya i vyboru elektrooborudovaniya, RD 153-34.0-20.527-98: pod red. B.N. Neklpaeva, [Guidance on the Calculation of short-circuit and Selection of Electrical Equipment. RD 153-34.0-20.527-98], (2002), Moscow, Russian Federation, *Izd-vo NTs ENAS* (In Russian).

10. Pravila ustrojstva jelektroustanovok [Rules for Electrical], (2009), Kharkov, Ukraine (In Russian).



Бесараб
Александр Николаевич,
канд. техн. наук, доц. каф. электроснабжения и энергетического менеджмента Одесского нац. политехн. ун-та.
Тел.: (048) 705-85-67.
E-mail: al_besarab@ukr.net



Невольниченко
Валентин Николаевич,
канд. техн. наук, доц. каф. электроснабжения и энергетического менеджмента Одесского нац. политехн. ун-та.
Тел.: (048) 705-85-48.
E-mail: vn_n@ukr.net



Шабовта
Михаил Юрьевич,
канд. техн. наук, ст. преподаватель каф. электроснабжения и энергетического менеджмента Одесского нац. политехн. ун-та.
Тел.: (048) 705-85-67.
E-mail: poststudent@ukr.net