

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ АВАРИЙНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГИ ПОСТОЯННОГО ТОКА 1. КОРОТКОЕ ЗАМЫКАНИЕ БЕЗ ТЯГОВОЙ НАГРУЗКИ

У статті викладено математичну модель системи тягового електропостачання без навантаження у режимі короткого замикання, та результати розрахунків цього аварійного процесу. Визначено перехідні величини та характер їх зміни, які можна використовувати для визначення аварійних режимів.

В статье изложена математическая модель системе тягового электроснабжения без нагрузки в режиме короткого замыкания, и результаты расчетов этого аварийного процесса. Определены переходные величины, а также характер их изменения, которые можно использовать для определения аварийных режимов.

The article deals with the description of the mathematical model the system traction electric power supply without loading in the short circuit condition and the result of the reserches this accident process. The transition quantity has been defined, and character their change too, which can use for the determined accidents processes.

Существующие в настоящее время система и оборудование защиты тяговой сети постоянного тока, базирующиеся на быстродействующих выключателях (БВ), практически уже не удовлетворяют современным требованиям эксплуатации железных дорог Украины вследствие большого числа ложных срабатываний, недостаточного быстродействия, низкой чувствительности и др. Поэтому повышение эффективности работы существующей защиты путем дооснащения её новыми устройствами, а также усовершенствование методов выбора уставок БВ является важнейшей проблемой электроснабжения системы электрической тяги. И вполне естественно, что эта проблема не может быть решена без исследований переходных аварийных процессов, протекающих в системе «тяговая подстанция (ТП) – тяговая сеть (ТС) – электроподвижной состав (ЕПС)», без нахождения и оценки признаков которых невозможно усовершенствовать систему защиты.

Исследование аварийных режимов в нелинейной динамической системе «ТП – ТС – ЕПС» возможно: экспериментальным путем в реальных условиях эксплуатации; физическим моделированием на лабораторных стендах; методами математического моделирования. Изучение аварийных переходных процессов в условиях реальной эксплуатации требует значительных материальных затрат, нередко приводя к выходу из строя элементов системы, требует дополнительных условий и времени на испытания, исключает возможность исследований случайных процессов. Лабораторные стендовые испытания также ограничены как матери-

альными затратами, так и объемом и достоверностью получаемой информации. Поэтому наиболее целесообразным путем исследований аварийных, тем более стохастических, переходных электромагнитных процессов в системе электрической тяги является метод математического моделирования на ЭВМ. Использование этого метода не только позволяет упростить и сократить последующие проверочные натурные испытания, но и расширяет возможности исследований, так как допускает широкую вариацию значений параметров элементов силовых электрических цепей системы тяги без значительных материальных затрат. О перспективности, более того, приоритетности математического моделирования переходных процессов, как метода способствующего разработке более совершенных систем защиты, свидетельствуют также зарубежные публикации [1–7]. Что же касается отечественных публикаций по рассматриваемому вопросу относительно железных дорог Украины, то такие авторам данной работы неизвестны, что тем более делает настоящую публикацию актуальной и своевременной.

Наиболее частым аварийным режимом в системе «ТП – ТС – ЕПС» является режим короткого замыкания, который может происходить как в тяговой сети так и на ЭПС. Целью настоящей работы является математическое моделирование процессов при коротком замыкании в тяговой сети.

Одним из основных этапов математического моделирования является построение (создание) собственно математической модели системы

«ТП – ТС – ЕПС». В дальнейшем принято, что тяговая подстанция (ТП) – это реальный источник напряжения с внутренним активно-индуктивным сопротивлением. Электроподвижной состав (ЭПС) – нелинейная динамическая нагрузка, имеющая электрическую цепь тоже с сосредоточенными параметрами. Некоторые особые замечания следует оговорить только относительно тяговой сети (ТС).

Как известно, межподстанционный участок ТС в общем случае можно рассматривать как электрическую цепь с сосредоточенными параметрами (как короткую линию [8, с. 175]) или с распределенными параметрами (как длинную линию [8]). Критерием «короткой» линии является условие, что  $l \ll \lambda$ , а «длинной»  $l \geq \lambda$ , где  $l$  – физическая длина линии, а  $\lambda$  – длина волны напряжения и тока в линии. Считая напряжение в ТС идеально сглаженным, имеем, что длина  $\lambda$  в сети равна бесконечности:  $\lambda = \frac{c}{f} = \frac{c}{0} = \infty$ , где  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с – скорость распространения электромагнитных волн в воздухе. А поскольку длина  $l$  межподстанционного участка не превышает 20 км, то  $l \ll \lambda$  и можно заключить, что, во-первых, тяговую сеть постоянного тока следует анализи-

ровать как электрическую цепь с сосредоточенными параметрами. Во-вторых, так как напряжение в сети не превышает 4000 В (по требованиям), то токами утечки между контактным проводом и рельсом и через изоляцию можно пренебречь. Тогда такой первичный параметр линии как поперечная проводимость  $G_0$  [8, с. 170] равен нулю. Наконец, равенство нулю частоты питающего напряжения ( $f = 0, \omega = 0$ ) обуславливает возможность пренебрежения емкостным током между контактным проводом и рельсом, т. е. такой первичный параметр линии как емкость  $C_0 = 0$ .

Рассмотрим ситуацию, которая в практике работы системы тягового электроснабжения (СТЭ) является наиболее распространенной: короткое замыкание (КЗ) в СТЭ обобщенная схема которой представлена на рис. 1. На этом рисунке: ТП1, ТП2 – тяговые подстанции; БВ1, БВ2 – быстродействующие выключатели фидеров тяговых подстанций, которые действуют на одной межподстанционной зоне; ЭПС – движущийся электровоз (нагрузка);  $l$  – длина межподстанционной зоны;  $x_{эл}$  – координата электровоза на межподстанционной зоне;  $x_{кз}$  – координата места КЗ.

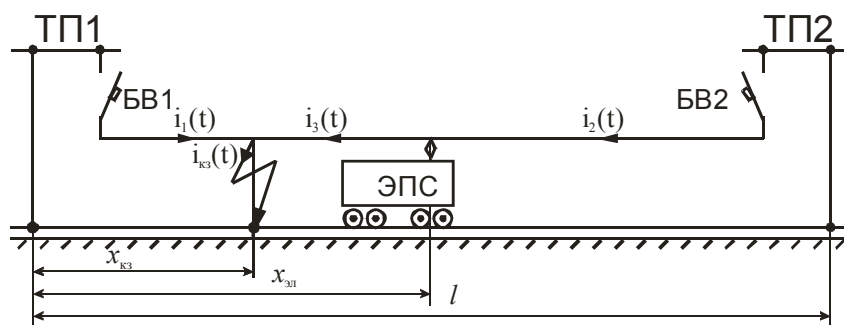


Рис. 1

В этой работе рассмотрим режим КЗ без тяговой нагрузки; схема замещения для этого случая представлена на рис. 2. Точка КЗ находится по середине межподстанционной зоны т.е.  $x_{кз} = \frac{l}{2}$ .

Определим допущения, принятые при проведении расчетов: контактная сеть – линия с сосредоточенными параметрами  $R_k, L_k$ ; параметры и характеристики тяговых подстанций одинаковы; ток уставки БВ  $I_{уст} = 3500$  А; тяговый ток полностью замыкается по рельсу (отсутствуют токи утечки); все элементы системы линейные; влажность окружающей среды – нормальная; температура окружающей среды – 20 °С.

На схеме рис. 2:  $U_{01}, U_{02}$  – напряжения х.х. ТП, равный 3450 В;  $U_{ТП1}, U_{ТП2}$  – выходные напряжения ТП;  $R_{Т1}, R_{Т2} = 0,14$  Ом [9] – внутренние активные сопротивления ТП;  $R_{рв1}, L_{рв1}, R_{иш1}, L_{иш1}, R_{рв2}, L_{рв2}, R_{иш2}, L_{иш2}$  – параметры схем замещения БВ фидеров ТП;  $R_{сг1}, L_{сг1}, R_{сг2}, L_{сг2}$  – параметры сглаживающих реакторов ТП;  $R_{к1}$  и  $L_{к1}, R_{к2}$  и  $L_{к2}$  – внутренние активные сопротивления и индуктивности соответствующего участка контактной сети;  $R_{р1}, R_{р2}$  – внутренние активные сопротивления соответствующего участка рельсовой цепи.

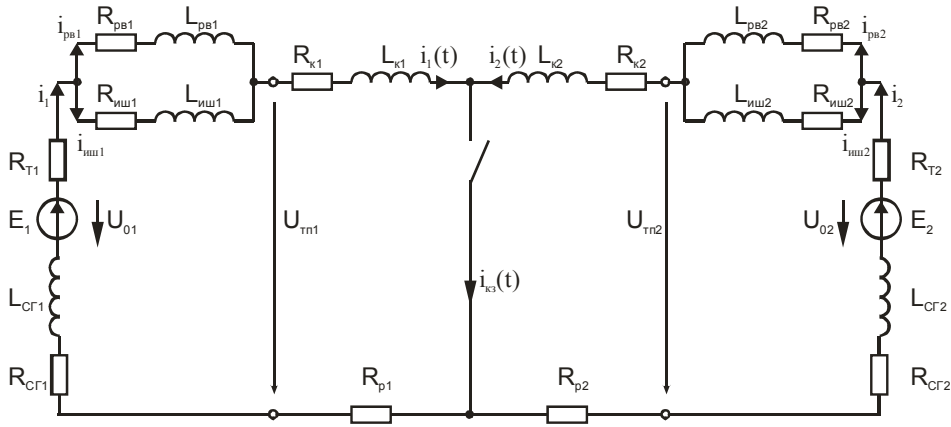


Рис. 2

Элементы схемы замещения БВ (рис. 3) типа ВАБ-43 [9, 10]: параметры размагничивающего витка:  $R_{рв} = 30 \cdot 10^{-6}$  Ом,  $L_{рв} = 1,1 \cdot 10^{-6}$  Гн; параметры индуктивного шунта:  $R_{иш} = 5,65 \cdot 10^{-6}$  Ом,  $L_{иш} = 2,54 \cdot 10^{-6}$  Гн.

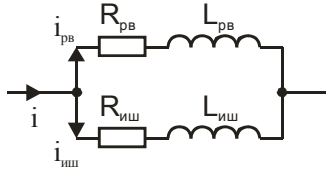


Рис. 3

Параметры контактной сети определяются конструктивным исполнением наиболее распространенной в тяговой сети постоянного тока контактной подвеске М-120+2МФ-100+А-185:  $R_K = 0,0424$  Ом/км.

Индуктивность контактной сети определяется индуктивностью петли «тяговая подвеска - рельс» [11]:

$$L = \left( 1 + 2 \ln \frac{10^4}{1,78 \cdot R \cdot \sqrt{10 \cdot \pi \cdot \omega \cdot \gamma_3}} \right) \cdot 10^{-4}, \quad (1)$$

где  $R$  – радиус провода;  $\gamma_3$  – удельная проводимость земли  $10^{-3}$  См/м;  $\omega$  – угловая частота.

Радиус проводов можно определить как эквивалентный радиус всех проводов подвески:

$$R = \sqrt{\frac{S_{экр}}{\pi}}, \quad (2)$$

где  $S_{экр}$  – эквивалентная площадь поперечного сечения системы «тяговая подвеска - рельс», определяется:  $S_{экр} = \sqrt{S_{ТП} \cdot S_p}$ , где  $S_{ТП} = 320$  мм<sup>2</sup> – площадь поперечного сечения тяговой подвески;  $S_p = 16580$  мм<sup>2</sup> – площадь поперечного сечения двух рельс;

Выполнив подстановку и расчеты по формулам (1)-(2), получим удельную индуктивность тяговой сети:  $L_K = 0,00225$  Гн/км. Параметры сглаживающего реактора типа РБФА-У-6500/3250:  $R_{сГ} = 9 \cdot 10^{-3}$  Ом  $L_{сГ} = 6,1 \cdot 10^{-3}$  Гн.

Расчеты переходных процессов выполним операторным методом нулевых начальных условиях, т. е. при  $i_1(t=0) = 0$  А,  $i_2(t=0) = 0$ .

Операторная схема замещения представлена на рис. 4; система операторных уравнений, составленная по методу контурных токов, имеет следующий вид:

$$\begin{cases} ((R_{р1} + R_{сГ1} + R_{Т1} + R_{К1} + R_{иш1}) + p(L_{сГ1} + L_{К1} + L_{иш1})) \cdot I_{11}(p) + 0 \cdot I_{22}(p) - \\ - (R_{иш1} + pL_{иш1}) \cdot I_{33}(p) + 0 \cdot I_{44}(p) = E_1(p) + (L_{сГ1} + L_{К1}) \cdot i_1(0) + L_{иш1} \cdot i_{иш1}(0), \\ 0 \cdot I_{11}(p) + ((R_{р2} + R_{сГ2} + R_{Т2} + R_{К2} + R_{иш2}) + p(L_{сГ2} + L_{К2} + L_{иш2})) \cdot I_{22}(p) + \\ + 0 \cdot I_{33}(p) - (R_{иш2} + pL_{иш2}) \cdot I_{44}(p) = E_2(p) + (L_{сГ2} + L_{К2}) \cdot i_2(0) + L_{иш2} \cdot i_{иш2}(0), \\ - (R_{иш1} + pL_{иш1}) \cdot I_{11}(p) + 0 \cdot I_{22}(p) + (R_{иш1} + R_{рв1} + p(L_{иш1} + L_{рв1})) \cdot I_{33}(p) + \\ + 0 \cdot I_{44}(p) = L_{рв1} \cdot i_{рв1}(0) - L_{иш1} \cdot i_{иш1}(0), \\ 0 \cdot I_{11}(p) - (R_{иш2} + pL_{иш2}) \cdot I_{22}(p) + 0 \cdot I_{33}(p) + \\ + (R_{иш2} + R_{рв2} + p(L_{иш2} + L_{рв2})) \cdot I_{44}(p) = L_{рв2} \cdot i_{рв2}(0) - L_{иш2} \cdot i_{иш2}(0). \end{cases} \quad (3)$$

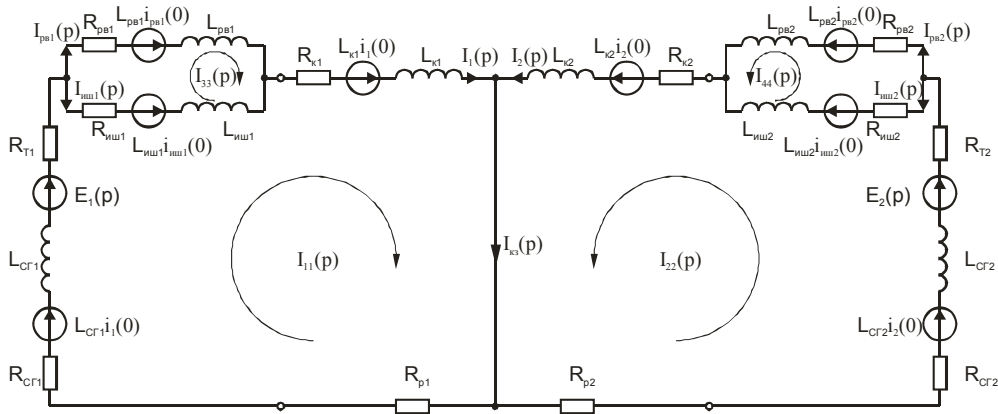


Рис. 4

После решения этой системы уравнения и нахождения изображений токов ветвей схемы, для определения оригиналов переходных токов используем теорему разложения [12]:

$$L^{-1} \left\{ \frac{F_1(p)}{F_2(p)} \right\} = f(t) = \sum_{k=1}^n \frac{F_1(p_k)}{F_2(p_k)} e^{p_k t}, \quad (4)$$

где  $p_k$  – простые корни характеристического уравнения  $F_2(p) = 0$ .

Результаты расчетов то есть, выражение переходных токов ветвей, а также тока короткого замыкания принимают вид:

$$i_1(t) = i_2(t) = 4253,9 + 61,651 \cdot e^{-15,9t} \times (69(-\cosh(12,4t) + \sinh(12,4t))) \text{ А,}$$

$$i_{кз}(t) = 8507,86 + 123,3 \cdot e^{-15,9t} \times (69(-\cosh(12,4t) + \sinh(12,4t))) \text{ А,}$$

$$i_{пв1}(t) = i_{пв2}(t) = 1417,9 + 61,651 \cdot e^{-15,9t} \times (-23 \cosh(12,4t) + 91,05 \sinh(12,4t)) \text{ А,}$$

$$i_{шш1}(t) = i_{шш2}(t) = 2835,95 + 61,651 \cdot e^{-15,9t} \times (-46 \cosh(12,4t) - 22,05 \sinh(12,4t)) \text{ А.}$$

Временные зависимости этих токов представлены на рис. 5 и 6, при этом установившиеся токи фидеров тяговых подстанций равны 4254 А. Представляют практический интерес и поэтому были определены переходные величины напряжений на выходе тяговых подстанций для случая КЗ в координате  $x_{кз} = \frac{l}{2}$ ; они имеют следующий вид:

$$u_{тп1}(t) = u_{тп2}(t) = 2459,73 + 254,4e^{-15,9t} \times (\cosh(12,4t) - \sinh(12,4t)) \text{ В.}$$

Графики изменения этих напряжений представлен на рис. 7.

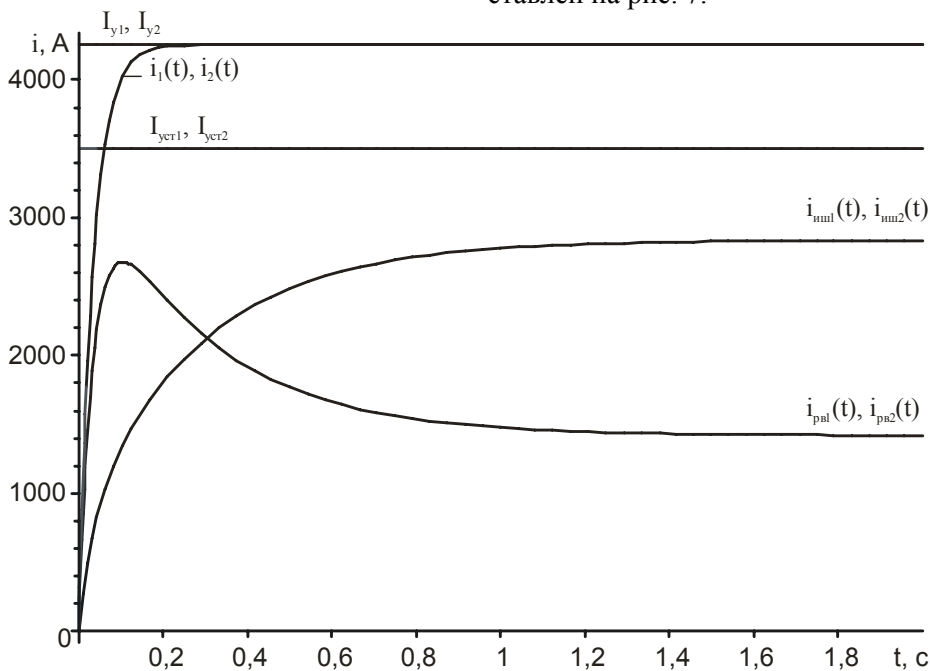


Рис. 5

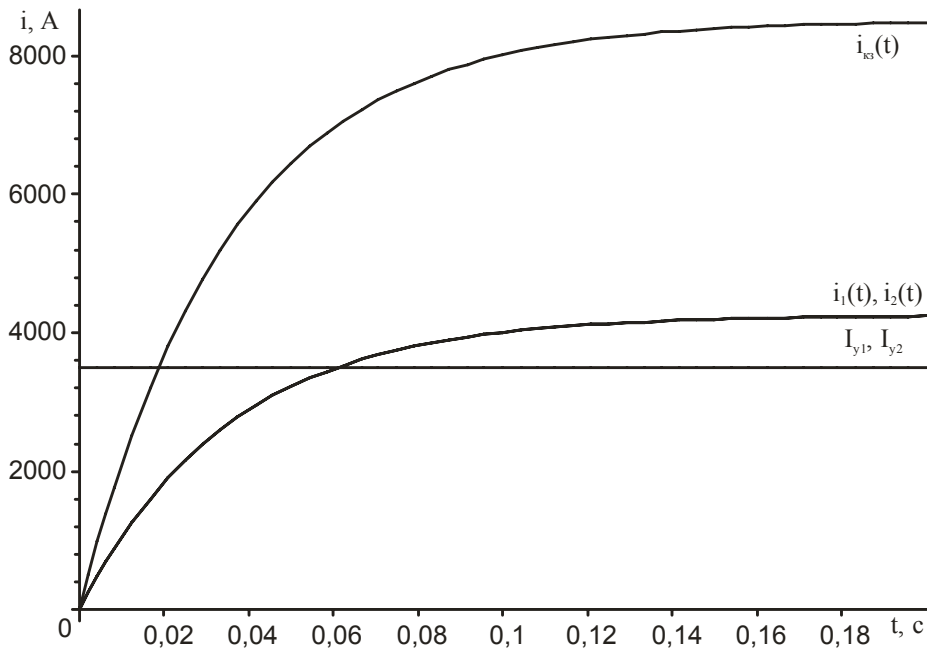


Рис. 6

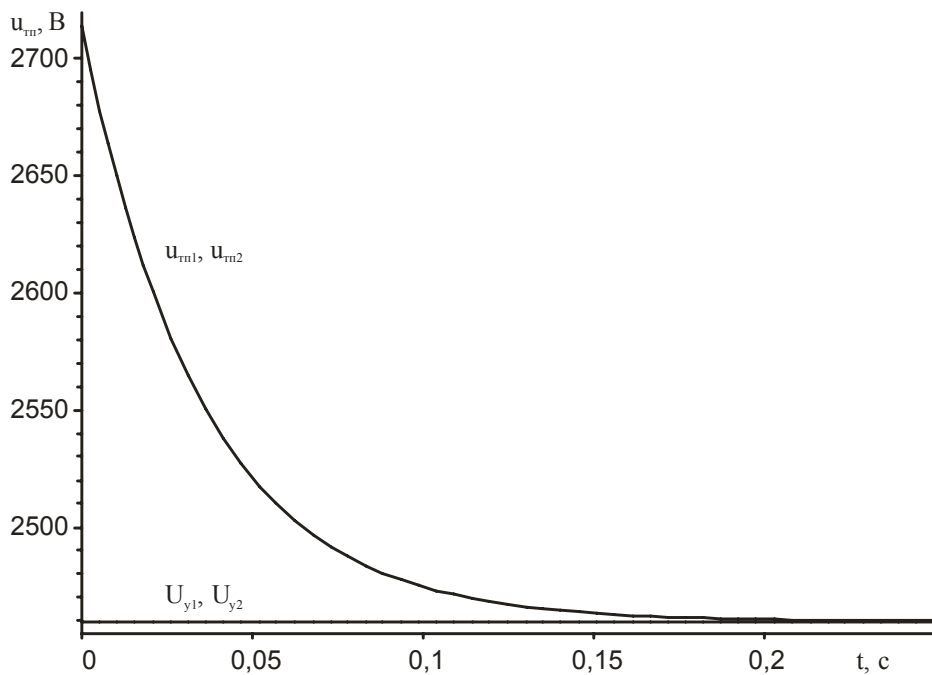


Рис. 7

Из анализа рис. 5-7 следует, что при возникновении короткого замыкания токи фидеров резко возрастают, а напряжение на зажимах тяговой подстанции резко падает. Тогда, эти признаки (как закономерности) особенно можно использовать в качестве критериев возникновения рассматриваемого аварийного режима.

Таким образом, анализ аварийных режимов СТЭ интересны как с теоретической так и практической точки зрения. Поэтому авторы считают своей дальнейшей задачей рассмотреть различные аварийные режимы работы СТЭ. При

этом предполагается усложнить и расширить математические модели с тем, чтобы в более полной мере, как качественно так и количественно анализировать описывать электромагнитные процессы в столь сложной нелинейной динамической системе как «ТП – ТС – ЕПС». В дальнейшем эта важная, с теоретической точки зрения, информация будет необходима для разработки современных микропроцессорных систем противоаварийной автоматики электрифицированных участков железных дорог.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Antonacci G. A. The low impedance short circuit on traction vehicles supplied by 3.6 kVdc plants. Experimental findings, numerical simulation aspects and considerations on the evaluations of electromagnetic disturbances. *Ingenieria Ferroviaria*, Settembre 1994. – P. 459–474.
2. Thomas Drebler. Dynamisches Verhalten von elektrischen Kenngrößen bei Kurzschlüssen in Gleichstrom-Bahnenergieversorgungsnetzen mit rückspeisefähigen Fahrzeugen / Thomas Drebler, Thomas Lösel, Steffen Röhling-Electrie, 1994. S. 468–474.
3. Thomas Drebler Problems in short circuit detection in DC railway traction networks with regenerative braking motor vehicles / Thomas Drebler, Thomas Lösel, Steffen Röhling-Elektrischen Bahnen, 1995, № 4, – S.134–139.
4. Кириевский Е. В. Моделирование аварийных режимов машин постоянного тока для оценки релейной защиты / Е. В. Кириевский, Г. Н. Степанов, Г. П. Фоменко – *Электричество* № 2, 1976, – С. 43–47.
5. Nimmersjo Gunnar. Real-time simulator for the testing of protection equipment/ Nimmersjo Gunnar, Lundovist Wertil – *Power Technology International*, 1989, pp.111–116.
6. Пупынин В. Н. Защита и отключение тяговых сетей в аварийных режимах. Дис. д-ра техн. наук., М. МИИТ, 1986. – 340 с.
7. Анисов А. Н. Повышение эффективности работы защиты фидеров контактной сети на основе исследования переходных процессов токов короткого замыкания в тяговой сети и на электроподвижном составе. Дис. ... канд. техн. наук.- М, МИИТ, 2000. – 138 с.
8. Атабеков Г. И. Теоретические основы электротехники. Часть 1. – М.-Л.: Энергия, 1964. – 312 с.
9. Сердинов С. М. Повышение надежности устройств электроснабжения электрифицированных железных дорог. – М.: Транспорт, 1985. – 301 с.
10. Векслер М. И. Защита тяговой сети постоянного тока от токов короткого замыкания. – М.: Транспорт, 1976. – 120 с.
11. Марквардт К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. – М.: Транспорт, 1982. – 528 с.
12. Зевеке Г. В. Основы теории цепей / Г. В. Зевеке, П. А. Ионкин, А. В. Нетушил, С. В. Страхов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.

Поступила в редколлегию: 16.05.2007.