

В. А. Зубенко

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту ім. Ак. Лазаряна (ДНТ)
Кафедра "Електропостачання залізниць", вул. Ак. Лазаряна 2, г. Дніпропетровськ, 49010, Україна
Тел./факс (0562) 331911, E-mail: vas@zva.dp.ua.

Б. А. Рябокін

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту ім. Ак. Лазаряна (ДНТ)
Кафедра "Електропостачання залізниць", вул. Ак. Лазаряна 2, г. Дніпропетровськ, 49010, Україна
Тел./факс (0562) 331911, E-mail: r_boris_a@mail.ru.

В. Г. Сиченко

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту ім. Ак. Лазаряна (ДНТ)
Кафедра "Електропостачання залізниць", вул. Ак. Лазаряна 2, г. Дніпропетровськ, 49010, Україна
Тел./факс (0562) 471674, E-mail: elsnz@mail.ru.

Annotation – The principles of DC circuit breaker model creation are presented in this article. Results of various DC circuit breakers type simulation are showed.

Key words - Electrified railway, DC, traction substation, circuit breaker, simulation.

ВСТУП

Швидкодіючі автоматичні вимикачі (ШВ) являються основними комутаційними апаратами на тягових підстанціях постійного струму, тому що саме вони забезпечують відключення контактної мережі при коротких замиканнях та перевантаженнях для уникнення негативних наслідків від дії аварійних струмів на обладнання підстанцій та контактну мережу. Одночасно вони можуть виконувати функцію захисту філерів контактної мережі та додаткові функції, пов'язані з роботою елементів автоматики й, у деяких випадках, здійснювати контроль за правильністю проведених дій при виконанні окремих операцій, пов'язаних з перемиканнями пристроїв у системі електропостачання.

На даний час на електрифікованих залізницях постійного струму застосовуються декілька типів ШВ: АБ-2/3, АБ-2/4, ВАБ-2, ВАБ-28, ВАБ-43, ВАБ-49, ВАБ-70, ВАБ-206, GERapid 4207, які встановлені на фідерах тягових підстанцій, постах секціонування та пунктах паралельного з'єднання.

У колах постійного струму ШВ повинен забезпечити надійне гасіння дуги при аварійному відключенні, коли сталий струм короткого замикання досягає значення 20-30 кА, що має місце при короткому замиканні поблизу підстанції, одночасно є потреба гасити дугу при струмах менших за 100 А при оперативному відключенні.

Нові вимикачі з поліпшеними технічними характеристиками та з новими камерами дугогасіння поставили питання про можливість їх використання на фідерах живлення в одиночному виконанні. Однак, через неможливість масових експериментальних досліджень різних режимів роботи при різних параметрах системи тягового електропостачання виникає задача розробки математичної моделі ШВ, за допомогою якої ж, до того, можливо проводити порівняльні дослідження вимикачів різних типів. Основою вирішення цієї задачі є сучасні вимірювальні комплекси й потужні пакети комп'ютерного моделювання які дозволяють, створюючи складні багатопараметричні нелінійні моделі електричних

ланцюгів та апаратів, одержувати результати з високою точністю та необхідним рівнем адекватності об'єктам моделювання.

Система математичного моделювання MATLAB з пакетом Simulink і бібліотекою SimPowerSystem знаходить широке застосування для моделювання електроенергетичних об'єктів та систем [1].

Однак спроба використовувати її для дослідження нестационарних процесів у тяговій мережі постійного струму, які супроводжуються комутацією окремих елементів системи, натрапила на перешкоду у вигляді відсутності в Simulink моделі швидкодіючого вимикача постійного струму (ШВ). У даній роботі розглянута розробка такої моделі за допомогою функціональних модулів MATLAB.

РОЗРОБКА МОДЕЛІ ВИМИКАЧА

Відповідно до теоретичних викладень щодо принципів відключення електричних кіл постійного струму [2], швидкодіючий вимикач можна розглядати як реальний вимикаючий пристрій із залізнюванням, в якому зустрічна напруга, яка вводиться в коло при короткому замиканні (напруга на контактах вимикача $U_d(t)$), є функцією часу (рис. 1).

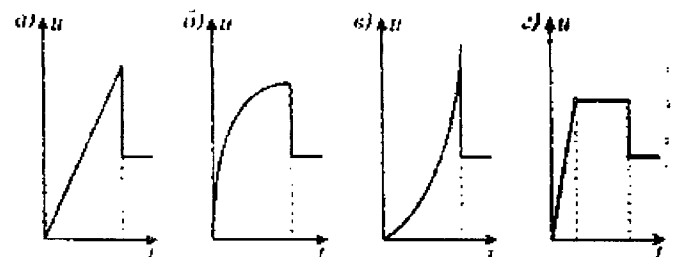


Рис. 1 Форми зустрічних напруг, що вводяться в коло вимикаючими пристроями в реальних умовах

Для прикладу на рисунках 2 та 3 показані дослідні осцилограми відключення короткого замикання різними вимикачами – з дугогасильною камерою повздовжньо-щілинного типу та камери з діюною решіткою, можна стверджувати, що вимикачу ВАБ-43 відповідає рис. 1, б, а GERapid 4207

– рис. 1, 2. Цей приклад показує неможливість створення універсальної, єдиної моделі ШВ та необхідність розробки математичної моделі кожного вимикача окремо.

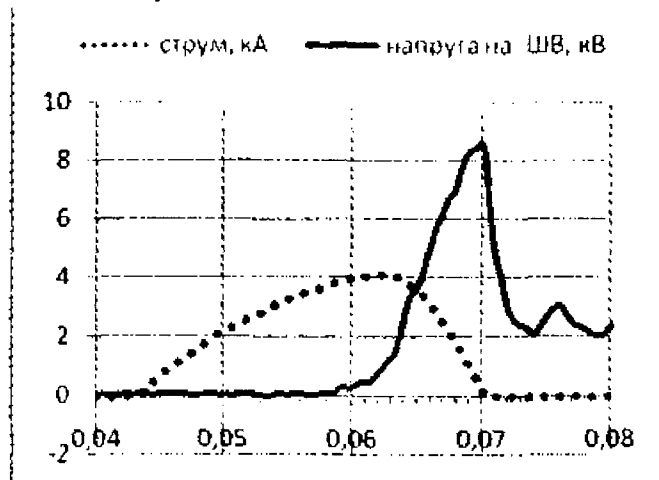


Рис. 2. Осцилограми відключення короткого замикання швидкодіючим вимикачем 2хВА6-43

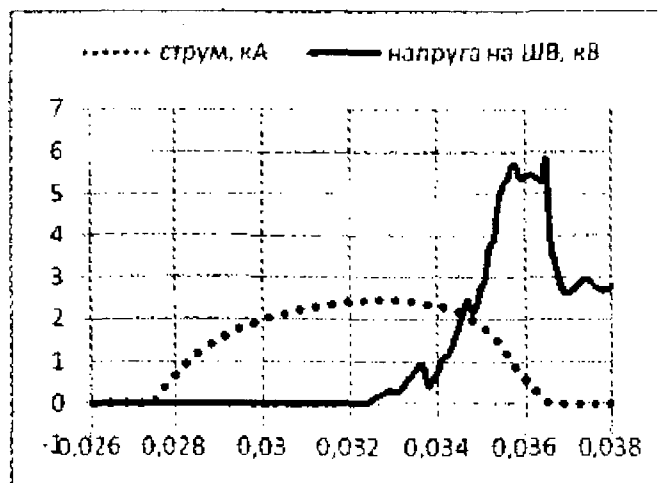


Рис. 3. Осцилограми відключення короткого замикання швидкодіючим вимикачем GERapid 4207

Розглянемо процес відключення струму КЗ ШВ, який згідно [2] ділиться на три етапи. Перший, час t_1 на Рис. 4, з моменту виникнення КЗ до досягнення струмом I_{K3} значення уставки. Цей час визначається параметрами кола КЗ й від ШВ не залежить. Другий, це час $t_2 - t_1$, так званий власний час відключення вимикача. Визначається як інтервал між часом досягнення струмом уставки I_u й часом початку розходження контактів ШВ. Цей час залежить від конструкції вимикача й у багатьох випадках від величини струму, що відключається, та швидкості його зміни di/dt . Третій інтервал $t_4 - t_2$, час гасіння дуги. Це час із моменту початку розходження контактів до моменту згасання дуги. У цей час, як добре видно на рис. 4, напруга на контактах, що розходяться, $U_d(t)$ збільшується, досягаючи свого максимального значення, що визначається конструкцією дугогасильної камери й принципом гасіння дуги, і різне для різних типів ШВ. При розробці моделі нас цікавлять два відрізки часу ($t_1 - t_2$ та $t_2 - t_3$).

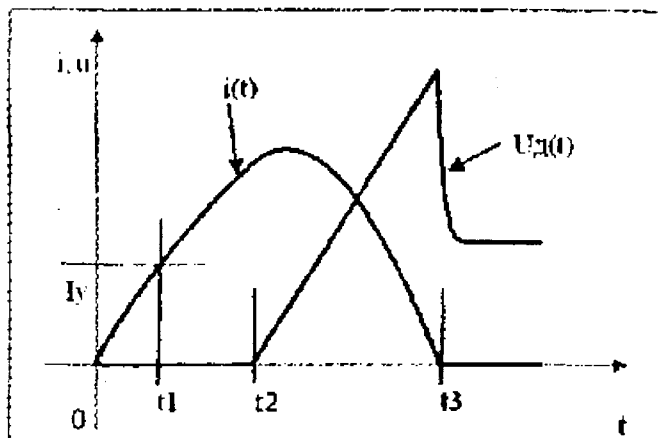


Рис. 4. Основні етапи процесу розвитку та відключення КЗ

Аналітичний розрахунок процесу відключення кола постійного струму й гасіння дуги в ШВ виконувався в [3]. При цьому автор використовував емпіричні формули для визначення градієнта напруги в дузі, швидкості її руху й струму дуги. Також, у цій роботі відзначалося, що при струмах більше 1000 А напруга на дузі швидкодіючого вимикача $U_d(t)$ не залежить від величини струму, а обумовлена лише конструктивною особливістю дугогасильної камери та самою конструкцією швидкодіючого вимикача. Це ствердження використовувалося в роботі [4] для створення моделі ШВ і використанні її при порівнянні можливостей, що відключають, ШВ різних типів. У цій роботі автори моделювали тільки процес відключення ШВ на ділянці $t_2 - t_3$ (рис. 4). Вольт-секундна характеристика дуги для конкретного типу ШВ отримувалася експериментальним методом після лівної обробки ряду осцилограм, а потім вводилася в модель. Але при цьому ділянка $t_1 - t_2$ приймалася незмінною, що не дозволяє говорити про повну адекватність запропонованої моделі в [3].

Прикладом важливості урахування цього часу може служити рисунок 5, на якому показані експериментально зняті вольт-секундні характеристики ШВ GERapid 4207 на одній з тягових підстанцій Донецької залізниці при різних відстанях до місця КЗ. При цьому власний час вимикача $t_1 - t_2$ змінювався від 10 до 50 мсек.

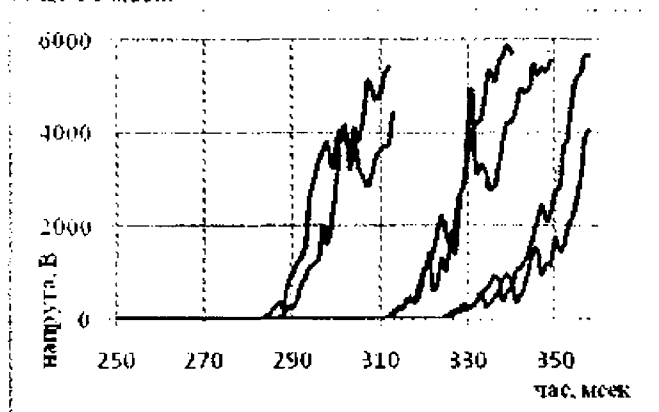


Рис. 5. Експериментальні вольт-секундні характеристики ШВ GERapid 4207

В загальному випадку цей час є функцією, яка залежить від конкретної конструкції ШВ та принципу роботи механізму відключення [6]:

$$t_{1-2} = \left[i(t), \frac{di(t)}{dt}, \int i(t) \right]. \quad (1)$$

Аналітичне визначення цього інтервалу ускладнене. Можливо представлення t_{1-2} у вигляді багатомірної матриці типу $A = \|t_{p,i,d}\|$, де індексами елементу матриці служать пропорційне, інтегральне та диференціальне значення вхідного струму, зв'язані з великим розміром матриці й складністю її заповнення при проведенні експериментальних випробувань.

Для вирішення цієї задачі пропонується використовувати Neural Network Toolbox, що входить до складу MATLAB, та реалізувати функцію (1) у вигляді простої нейронної мережі (рис. 6).

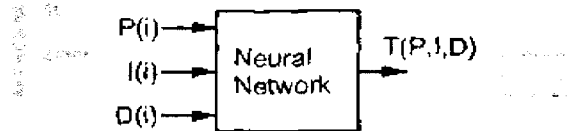


Рис. 6. Нейронна мережа для визначення затримки спрацювання ШВ

На підстанціях постійного струму встановлені реєстратори аварійних подій «Регіна» і мікропроцесорні системи захисту типу ЦЗА-5, які зберігають осцилограми перехідних процесів. Цей факт дозволяє набрати масив експериментальних даних для навчання і тестування нейронної мережі під конкретний тип вимикача.

Пропонована модель вимикача (рис. 7) складається з декількох блоків, що зв'язані між собою.

Блок Subsystem2 містить: блоки визначення похідної та інтегрального параметра вхідного струму, нейронну мережу та формувач затримки. В цьому блоці порівнюється величина струму в колі з уставкою та формується сигнал на запуск роботи нейронної мережі, яка враховує необхідне запізнення відключення вимикача та забезпечується управління блоком Subsystem1.

Блок Subsystem1 приєднаний паралельно до ідеального ключа, саме в ньому задається функція напруги дуги та формується протинапруга, яка в подальшому впливає на розвиток струму к.з.

При досягненні струму в колі значення «0», протинапруга відключається та електричне коло уже повністю розмикається.

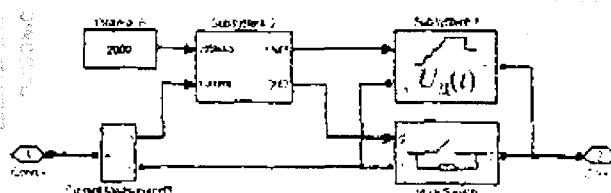


Рис. 7. Модель вимикача в середовищі Simulink

Для порівняння, на рис. 8 та рис. 9 наведені осцилограми відключення струму КЗ ШВ GERapid, які були одержані експериментально та за результатами моделювання відповідно.

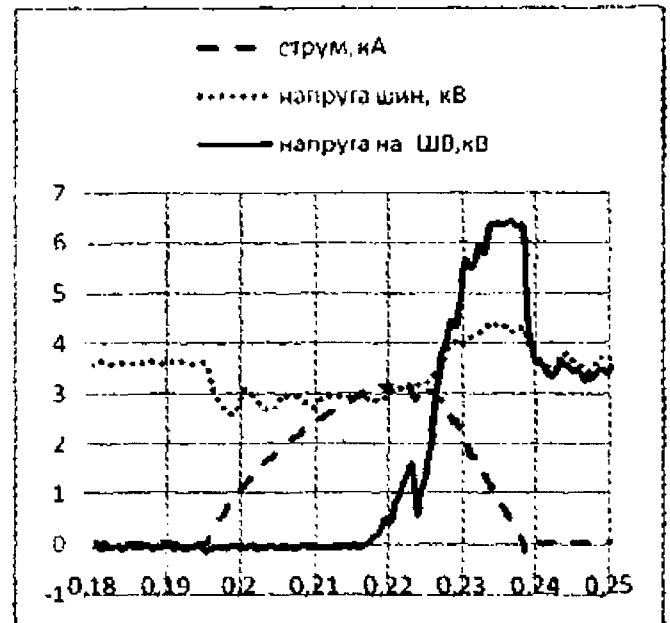


Рис. 8. Осцилограма відключення КЗ ШВ GERapid

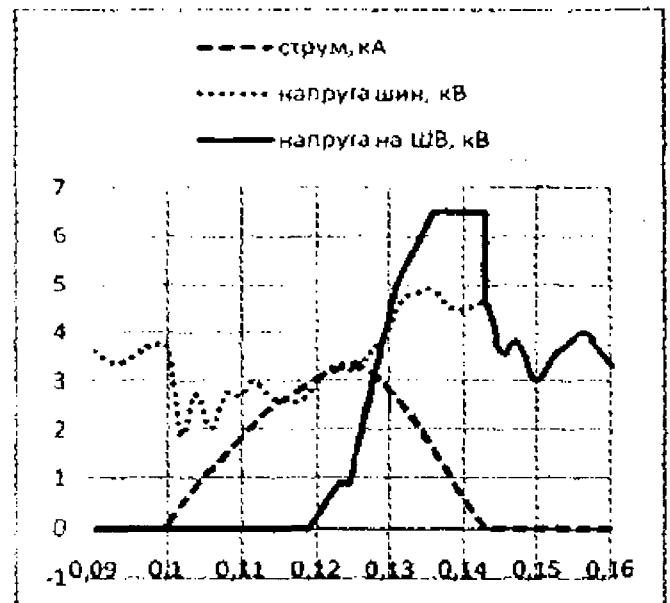


Рис. 9. Результати моделювання процесу відключення струму КЗ

РЕЗУЛЬТАТИ ПОРІВНЯЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Порівняння вимикачів проводилося на моделі тягової мережі з повністю ідентичними параметрами, для чотирьох випадків КЗ: віддалене КЗ біля шин сусідньої тягової підстанції на відстані 16 км, посередині міжпідстанційної зони на відстані 8 км, біля ППЗ - 4 км, і близьке - на відстані 0,5 км від шин підстанції.

Для всіх типів вимикачів моделювалося однакове значення уставки рівне 3000 А. Розрядний пристрій у всіх випадках був відключений.

Ефективність відключення струму КЗ оцінювалася по чотирьох параметрах:

- по амплітуді струму, що відключався I (А);
- тривалості протікання струму з моменту початку КЗ і до його повного відключення - час відключення ШВ, T (мсек);
- по параметру I^2t (А²·сек), який дозволяє оцінити кількість енергії, що виділяється в місці КЗ;

- енергія S (Дж) – енергія, що розсіюється в дугогасильній камері швидкодіючого вимикача.

Результати моделювання для більшої наглядності представлені у вигляді графіків, представлених на рис. 10-13. На кожному графіку для всіх вимикачів, що оцінюються, відображується один з параметрів за яким проводилось їх порівняння.

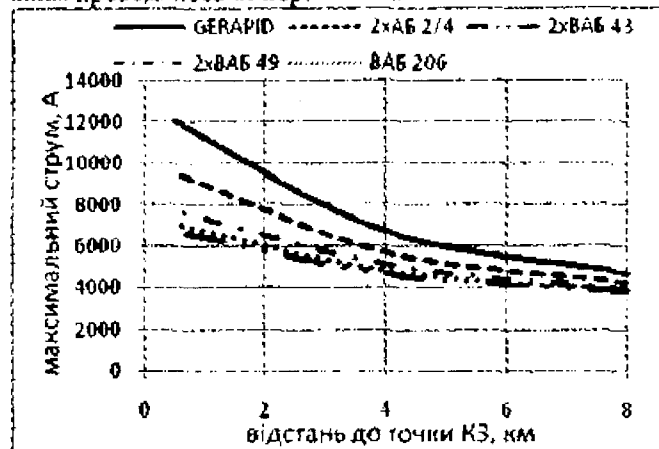


Рис. 10. Залежність максимального струму КЗ від відстані до місця КЗ.

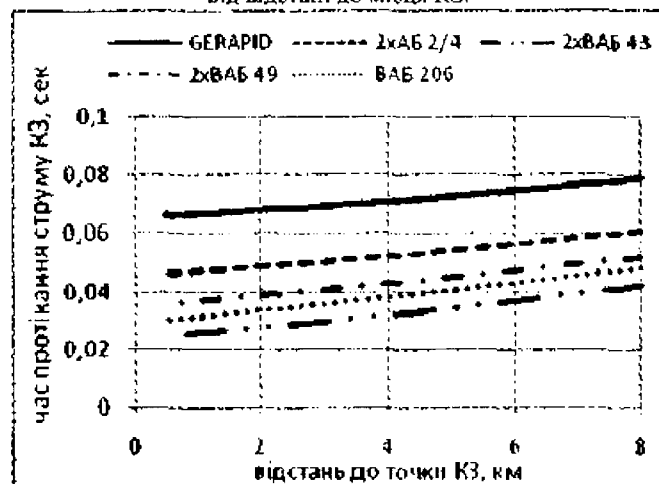


Рис. 11. Залежність часу протікання струму КЗ від відстані до місця КЗ

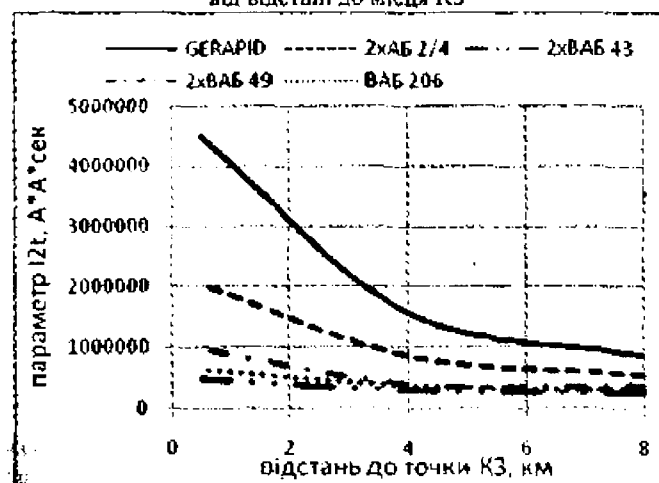


Рис. 12. Залежність параметру I^2t від відстані до місця КЗ

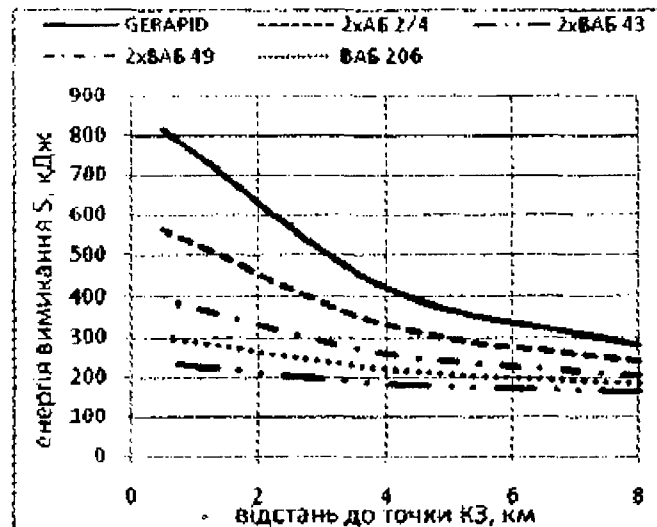


Рис. 13. Залежність енергії вимкнення від відстані до місця КЗ

ВИСНОВКИ

Розроблені моделі ШВ дозволяють більш точно досліджувати енергообмінні процеси, протікаючі у системі тягового електропостачання при короткому замиканні й наступному його відключенні та маючи складний характер, обумовлений наявністю декількох взаємозалежних контурів струму з реактивними елементами L і C , нелінійністю рейкових кіл, а також електромагнітною взаємодією контактних підвісок сусідніх колій і впливом ЕРС. Їх також можна використовувати для аналізу процесів в силовому активному фільтрі постійного струму для вивчення нестационарних режимів роботи системи тягового електропостачання та оцінки ефективності різних типів ШВ і роботи розрядних пристроїв.

[1] Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, Simpowersystems и Simulink. – М.: ДМК-Пресс; спб.: Питер, 2008. – 288 с.

[2] Бей Ю.М., Мамошин Р.Р., Пупынин В.Н., Шалимов М.Г. Тяговые подстанции: Учебное пособие для вузов ж.-д. транспорта. – М.: Транспорт, 1986. – 319 с.

[3] Радченко В.Д. Техника высоких напряжений устройств электрической тяги. – М.: Транспорт, 1975. – 360 с.

[4] Пупынин В.Н., Дарчиев С.Х. Сравнение фидерных выключателей постоянного тока 2хВАБ-49-3200/30-Л и GERapid 4207 2х4 – Железные дороги мира 2006. – №5. – С. 64-71.

[6] Векслер М.И., Защита тяговой сети постоянного тока от токов короткого замыкания. «Транспорт», 1976. – 120 с.