

УДК 621.316.9

ОСОБЕННОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ И СПОСОБЫ ЗАЩИТЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ШАХТНОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ПРИ НЕШТАТНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ

В. О. Черная

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: seem@kdu.edu.ua

И. О. Синчук, М. А. Баулина

Криворожский национальный университет
ул. XXII Партсъезда, 11, 50027, г. Кривой Рог, Украина

Приведены результаты исследований причин возникновения нештатных режимов работы тяговых электротехнических комплексов, связанных с нарушением качества электропитания тяговых электрических двигателей, и способы устранения этого влияния на работу электрооборудования шахтных электровозов. Предложены структурные схемы защит тягового электрооборудования. Представлена математическая модель защиты подвижного состава при нарушении питания электрооборудования.

Ключевые слова: электротехнический комплекс, система защиты, сети Петри, сверхнапряжение.

ОСОБЛИВОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ТА СПОСОБИ ЗАХИСТУ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО КОМПЛЕКСУ ШАХТНОГО РУХОМОГО СКЛАДУ ПРИ НЕШТАТНИХ РЕЖИМАХ РОБОТИ

В. О. Чорна

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: seem@kdu.edu.ua

І. О. Сінчук, М. А. Бауліна

Криворізький національний університет
вул. XXII Партз'їзду, 11, 50027, м. Кривий Ріг, Україна

Наведено результати досліджень причин виникнення нештатних режимів роботи тягових електротехнічних комплексів, пов'язаних з порушенням якості електроживлення тягових електродвигунів, та способи усунення такого впливу на роботу електрообладнання шахтних електровозів. Запропоновано структурні схеми захистів тягового електрообладнання. Представлено математичну модель захисту рухомого складу при порушенні живлення електрообладнання.

Ключові слова: електротехнічний комплекс, система захисту, мережі Петрі, наднапруга.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. На шахтах и рудниках отечественных горных предприятий эксплуатируется несколько тысяч единиц электроподвижного состава (ЭПС), осуществляющих доставку добываемых полезных ископаемых.

К сожалению, применяемые на шахтном ЭПС тяговые электротехнические комплексы (ТЭТК) являются неэффективными и небезопасными в эксплуатации.

Для замены эксплуатируемых неэффективных тяговых электротехнических комплексов в последние годы возобновились исследования в направлении создания эффективных и безопасных их типов для электрического подвижного состава шахт (рудников) [1].

Между тем, выпуск новых разработок пока задерживается. Одной из технических причин такой задержки является следующее.

Функционирование тяговых электротехнических комплексов в условиях подземных выработок сопровождается возникновением нештатных ситуаций, которые могут быть спровоцированы нарушением режимов работы тяговых двигателей, преобразовательных агрегатов, а также влиянием негативных факторов со стороны питающей контактной сети (ПКС), таких, как превышение напряжения, сверхнапряжения, исчезновение и последующее восстановление напряжения. Указанные факторы имеют различную степень влияния на работоспособность ТЭТК в целом, однако одинаково отрицательно сказываются на уровне эффективно-

сти и надежности его функционирования. Поэтому разработка мер по снижению влияния указанных факторов и способов их устранения является актуальной задачей для отечественного парка рудничных электровозов, результаты решения которой позволят повысить надежность и эффективность всего комплекса.

Целью исследований является изучение особенностей возникновения и развития нештатных режимов в ПКС, а также разработка мер защиты электрооборудования ТЭТК от их негативного влияния.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. Анализ нештатных ситуаций необходимо проводить на соответствие условиям, обеспечивающим надежность ТЭТК, безопасность его обслуживания, предупреждение и устранение аварийных ситуаций.

Разработанные и применяемые в практике эксплуатации схемы ТЭТК рудничных электровозов лишены средств защиты электрических преобразовательных устройств, тяговых двигателей, элементов цепи собственных нужд от негативных факторов, возникающих в ПКС [1]. Авторами разработана структура схемы ТЭТК, предполагающая защиту от таких ситуаций. Разработанная схема ТЭП (рис. 1) позволяет решать следующие задачи:

– защитить силовую цепь от сверхимпульсов напряжения в контактной сети при помощи ограничителя RUU;

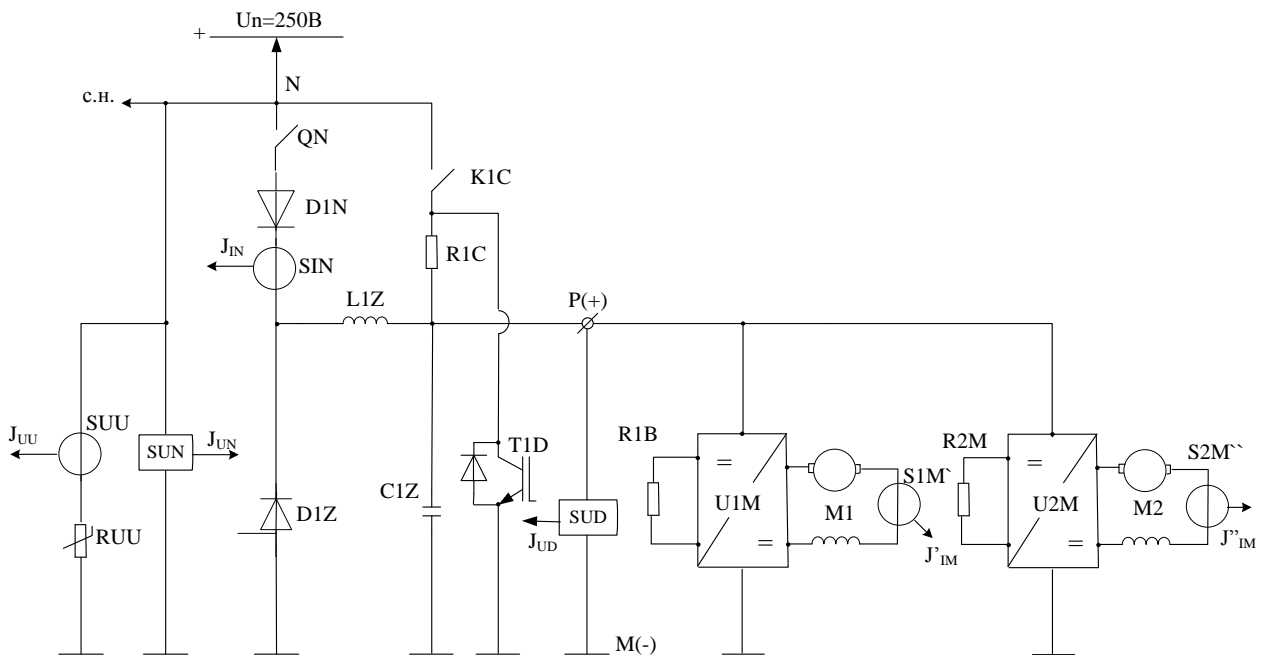


Рисунок 1 – Принципиальная схема тягового электропривода рудничного контактного электровоза и устройств защиты от нештатных ситуаций

– защитить силовую цепь ТЭТК от пульсаций напряжения 300 Гц, генерируемую в контактной сети выпрямителями подстанции, с помощью входного фильтра Z;

– защитить контактную сеть от высокочастотных кондуктивных помех, генерируемых преобразователями, с помощью фильтра Z;

– контролировать уровни напряжения и токов с помощью датчиков тока SI и напряжения SU;

– обеспечивать отключение силовой цепи в аварийных ситуациях с помощью автомата QN.

В рамках данной работы рассмотрению подлежат вопросы защиты электрооборудования ТЭТК от влияния негативных факторов, возникающих в ПКС.

Под сверхнапряжением в электрической цепи принято понимать неконтролируемый процесс увеличения напряжения, который может быть вызван дребезгом контакта пантографа с контактным проводом или взаимным влиянием нескольких работающих от одной сети электровозов, когда отключение одного из них приводит к резкому скачку напряжения в контактной сети и, соответственно, к изменению величины тока и напряжения работающих ТЭТК [2, 3].

Проникновению импульса напряжения в тяговую цепь препятствует входной фильтр L1Z-C1Z электропривода.

Для защиты от сверхимпульсов служит мощный полупроводниковый ограничитель напряжения RUU, обладающий стабилитронной характеристикой.

Однако ограничитель RUU имеет ограниченное число срабатываний, поэтому последовательно с ним включен датчик тока SUU, который выдает в систему управления импульс j_{UU} при каждом срабатывании ограничителя. Система управления отсчитывает импульсы срабатываний и выдает предупредительный сигнал, когда их число приближается к

предельному, т. е. когда требуется замена ограничителя.

К возможным причинам исчезновения питающего напряжения на входе электропривода можно отнести:

- короткое замыкание сети;
- обрыв провода контактной сети;
- длительный отрыв пантографа от контактного провода [2, 3].

В этом случае защиту электрооборудования осуществляет входной фильтр Z.

Дроссель фильтра L1Z через нулевой диод D1Z разряжается на конденсатор C1Z и нагрузку U1M-M1, U2M-M2 (рис. 1). После разряда L1Z конденсатор C1Z продолжает разряжаться на нагрузку до тех пор, пока напряжение в тяговой цепи не опустится до минимально допустимого уровня. По достижении нижнего порога напряжения U_{dmin} и отсутствии сигналов J_{UN} , J_{IN} отключаются автомат QN и преобразователи U1M и U2M. Конденсатор фильтра C1Z остается заряженным до порогового напряжения. В случае короткого замыкания на входе электропривода заградительный диод D1N предотвращает разряд конденсатора C1Z через дроссель L1Z вместо короткого замыкания, не усугубляя тем самым аварию.

При восстановлении напряжения в контактной сети датчик SUN сигнализирует об этом, и, если уровень восстановленного напряжения выше минимального порогового, включается контактор K1C, фильтровый конденсатор заряжается до нормального уровня, включается автомат QN, отключается K1C. Включением преобразователей U1M и U2M электропривод вводится в рабочий режим.

Однако возможно скачкообразное восстановление сверхнапряжения, например, при разрыве короткого замыкания. В этом случае возможно срабатывание ограничителя RUU и тяговый электропри-

вод не вводится в режим до установления нормального напряжения в контактной сети.

Кроме описанных выше явлений, в электрической цепи ТЭТК нередко наблюдается повышение напряжения, что может быть спровоцировано различными причинами:

- многократными импульсами перенапряжений в контактной сети;
- частичным повреждением фильтрового конденсатора С1Z;
- вследствие самоотключения одного из двух преобразователей в тяговой цепи в силу каких либо причин.

Схема замещения электропривода при отключении одного из чопперов имеет вид, представленный на рис. 2. Переходный процесс в схеме иллюстрируют диаграммы (рис. 3) с исключением из рассмотрения рабочего чоппера U1M.

Превышение напряжения ΔU_d в тяговой цепи определяется из соотношения:

$$\Delta U_d^2 C_Z = I_d^2 L_Z; \Delta U_d = I_d \sqrt{\frac{L_Z}{C_Z}} = I_d \rho_Z,$$

где $\rho_Z = \sqrt{\frac{L_Z}{C_Z}}$ – волновое сопротивление фильтра.

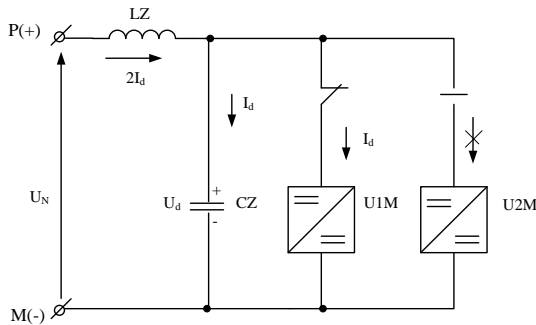


Рисунок 2 – Схема замещения тягового электротехнического комплекса при отключении одного из чопперов в момент времени t_0

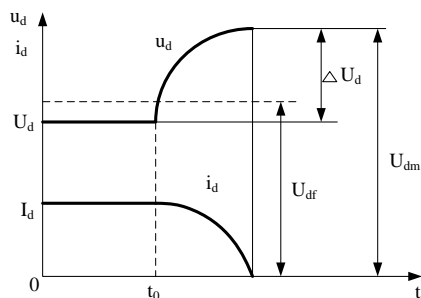


Рисунок 3 – Кривые тока и напряжения в аварийном режиме функционирования тягового электротехнического комплекса

Амплитуда перенапряжения U_{dm} превышает допустимый уровень U_{df} , который обычно принимается равным $1,2U_{d \max}$. Снижение U_{dm} за счет уве-

личения емкости конденсатора С1Z или уменьшения индуктивности L1Z неприемлемо.

Для ограничения роста напряжения в тяговой цепи предусмотрен IGB транзистор T1D, который при $U_d = 1,2U_{d \max}$ подключает к фильтровому конденсатору разрядный резистор R1C, который в данном случае выполняет функцию зарядного. Схема замещения принимает вид, представленный на рис. 4. Начальные условия – $t=0$:

$$i_{d0} = I_d, U_{d0} = U_d = U_N.$$

Переходной процесс можно описать уравнениями:

$$u_c = u_d = U_d \left[1 + \exp(-\delta t) \left(\cos \omega_0 t - \frac{\delta}{\omega_0} \sin \omega_0 t \right) \right];$$

$$i_d = \frac{U_d}{R} - I_d \left[\exp(-\delta t) \left(\cos \omega_0 t + \frac{\delta}{\omega_0} \sin \omega_0 t \right) \right];$$

$$i_R = \frac{u_c}{R} = \frac{u_d}{R},$$

где $\delta = \frac{1}{2RC}$ – коэффициент затухания контура;

$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC} - \delta^2}$ – частота собственных колебаний.

Когда рост напряжения в тяговой цепи возникает из-за многократных импульсов перенапряжений в контактной сети, возможна работа электропривода с частыми включениями-отключениями IGB транзистора T1D для поддержания напряжения U_d в тяговой цепи на нормальном уровне, но с обязательным контролем температуры резистора R1C, поскольку его мощность ограничена, при перегреве резистора R1C схема должна быть отключена от контактной сети размыканием автомата QN.

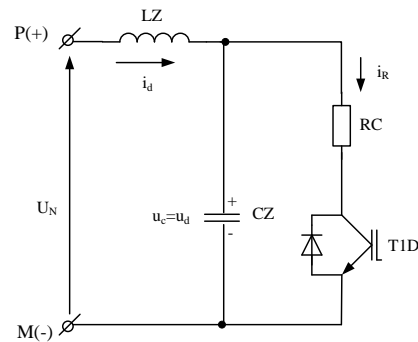


Рисунок 4 – Схема замещения разряда фильтрового конденсатора

Узел R1C–T1D обеспечивает также безопасность обслуживающего персонала при оперативном отключении электропривода; при отключении преобразователей UM и разрыве контакта QN на конденсаторе С1Z остается остаточное напряжение. Для разряда конденсатора до нуля включается цепочка R1C- T1D. После разряда конденсатора IGB транзистор T1D отключается.

Исходя из проведенных исследований по выявлению особенностей протекания нештатных режимов функционирования ТЭТК, были разработаны структурные схемы каналов защит электрооборудования в виде сетей Петри [4].

Сеть Петри канала защиты от сверхимпульса напряжения в ПКС представлена на рис. 5.

Сеть работает следующим образом. При возникновении аварийной ситуации место P1 получает фишку n=1, срабатывает переход t1, место P2 получает фишку n=1, в результате чего срабатывает переход t2 и место P2 получает фишку n=1. Таким образом, в систему управления (СУ) ТЭП выдается сигнал на отключение входного автомата QN и преобразователей UM (табл. 1).

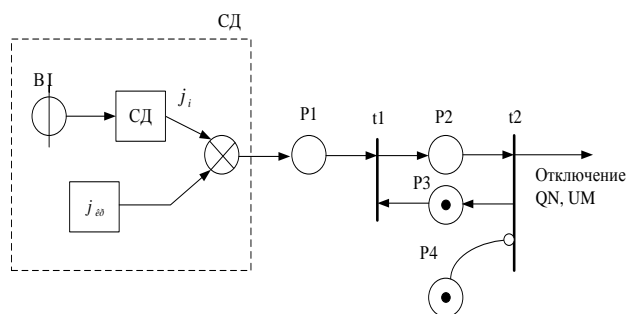


Рисунок 5 – Сеть Петри канала защиты от сверхимпульса напряжения

Для удержания аппаратов в отключенном состоянии режим «Авария» закидывается через P3, сеть срабатывает до упора и останавливается. Вывод сети из стопа производится оператором снятием фишки n=1 с P4 и установленной в P4 фишки n=0, что дает запрет на режим «Авария».

Таблица 1 – Обозначения по схеме рис. 5

Позиция	Условие – место	Позиция	Событие – переход
P1	При $j_i > j_{доп}$ n=1	t1	Срабатывает защита
P2	Аварийный режим	t2	Отключение QN UM
P3	Защелка		
P4	Оператор		

Защита при исчезновении и последующем восстановлении напряжения контактной сети или сети собственных нужд представлена сетью Петри (рис. 6, табл. 2, 3).

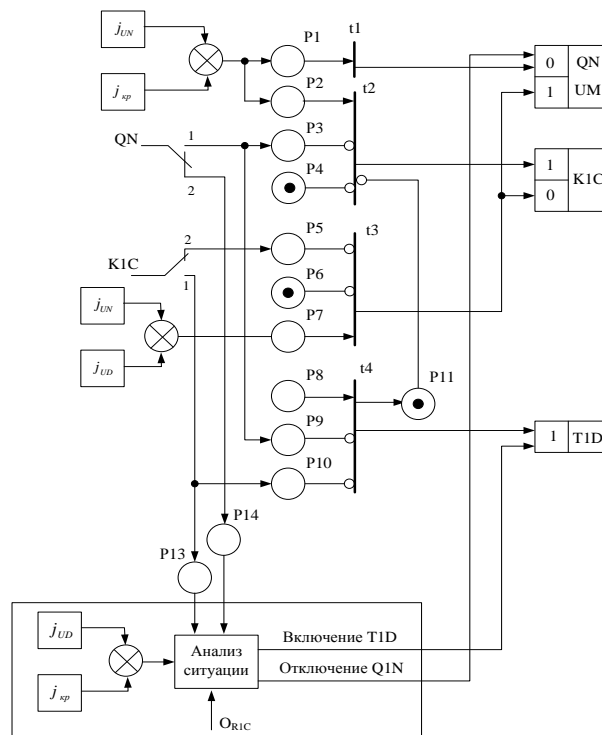


Рисунок 6 – Математическая модель защиты тягового комплекса при исчезновении и восстановлении напряжения контактной сети, разряда фильтрового конденсатора при перенапряжении в цепи и при полном обесточивании ее в виде сети Петри

Работа схемы по рис. 6 в соответствии с табл. 2 протекает следующим образом. При снижении напряжения контактной сети U_n менее критического уровня $U_{нкp}$ в P1 устанавливается фишка n=1, срабатывает переход t2, отключается автомат QN (закрывается блок-контакт 1) и отключаются чоперы U1M и U2M. В P3 устанавливается фишка n=1, таким образом, переход t2 подготовлен к срабатыванию, которое происходит при восстановлении напряжения контактной сети $U_n > U_{нкp}$. При этом в P1 устанавливается n=0, а в P2 n=1, благодаря чему

происходит включение контактора K1C (закрывается его блок-контакт 2). В P5 устанавливается фишка n=1, подготавливая переход t3 к срабатыванию. При этом происходит плавный заряд фильтрового конденсатора C1Z, и когда напряжение на нем U_D достигнет уровня напряжения контактной сети ($U_N - \Delta$), в P7 установится фишка n=1 и произойдет срабатывание перехода t3 на отключение K1C и включение QN и UM. Здесь Δ учитывает падение напряжения на дросселе L1Z входного фильтра. Таким образом, схема ТЭП вновь включится в работу.

Таблица 2 – Обозначения позиций по схеме рис. 6

Позиция	Событие – переход
t1	отключение QN, UM
t2	включение К1С
t3	отключение К1С, включение QN, UM
t4	включение Т1D для разряда конденсатора
t5	включение Т1D
t6	отключение QN

Таблица 3 – Обозначения позиций по схеме рис. 6

Позиция	Условие – место
P1	n=1 при $j_{UN} < j_{кр}$
P2	n=1 при $j_{UN} > j_{кр}$
P3	n=1 при откл. QN (замкн.1)
P4	оператор
P5	n=1 при вкл. К1С (замкн.2)
P6	оператор
P7	n=1 при $j_{UD} \geq j_{UN} - \Delta$
P8	оператор, n=1 при нажатии кнопки «разряд конденсатора»
P9	n=1 при откл. Q1N (замкн.1)
P10	n=1 при откл. К1С (замкн.1)
P11	Блокировка включения К1С, n=0 при срабатывании t4
P12	n=1 при $j_{UD} \geq j_{кр}$
P13	n=1 при откл. К1С (замкн.1)
P14	n=1 при вкл. QN (замкнут 2)
P15	n=1 при $j_{ORC} \geq j_{кр}$

В системе на рис. 6 предусмотрен также разряд конденсатора C1Z фильтра до нуля при отключении

системы ТЭТК во избежание поражения током обслуживающего персонала при проведении профилактики. Для этого оператору достаточно нажатием кнопки (в P8 вводится фишка n=1) привести к срабатыванию перехода t4, поскольку P9 и P10 уже имеют фишки n=1 (замкнуты блок-контакты 1). При этом в P11 устанавливается n=0, запрещая срабатывание перехода t2 на включение К1С. Срабатывание перехода t4 приводит к включению транзистора Т1D и разряду C1Z через R1С.

ВЫВОДЫ. Проведенные исследования по выявлению причин и изучению особенностей протекания нештатных ситуаций в тяговом электротехническом комплексе рудничных электровозов позволили обосновать выбор средств защиты электрооборудования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Комбинаторика преобразователей напряжения современных тяговых электроприводов рудничных электровозов / О.Н. Синчук, И.О. Синчук, Н.Н. Юрченко и др.; Научное издание. – К.: ИЕД НАН Украины, 2006. – 252 с.
2. Сидоренко В.М., Чорний О.П., Синчук І.О. Ймовірнісна модель аварійних ситуацій в системі електроживлення рудникового електровозу // Вісник Кременчуцького державного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук, 2008, Вип. 3/2008 (50). – С. 139–142.
3. Гинзбург С.Г. Методы решения задач по переходным процессам в электрических цепях. – М.: Высшая школа 1967. – 388 с.
4. Котов В.Е. Сети Петри. – М.: Наука, 1984. – 158 с.

FEATURES OF THE TRACTION AND METHODS OF PROTECTION MINE COMPLEX ELECTRICAL ROLLING STOCK AT WORK NON-STANDARD MODES

V. Chernaya

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University
vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: seem@kdu.edu.ua

I. Sinchuk, M. Baulina

Kryvoy Rog National University
ul. XXII Partsiezda, 11, Kryvoy Rog, 50027, Ukraine.

In article are brought results of studies of reasons of origin off-hour state of working tractive elektrotechniche complex, in accordance with breach quality power supplies of tractive electric engines and ways of removal of this influence upon functioning the electric equipment mine electric locomotive. The structural scheme of protection of electric traction are offered. A mathematical model of the protection of the rolling stock in violation of electrical power.

Key words: elektrotechniche complex, system of protection, network Petri, overvoltage.

REFERENCES

1. *Kombinatorika converters of the voltage modern tractive electric drive mining electric locomotive* / O.N. Sinchuk, I.O. Sinchuk, N.N. Yurchenko and oth.; Nauchnoe izdanie. – K.: IED NAN Ukraine, 2006. – 252 p. [in Russian]
2. Sidorenko V.M., Chornyj A.P., Sinchuk I.O. Probabilistic model of the emergencies in system electric power supply the mining electric locomotive // *Bulletin Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*. – Kremenchuk. – 2008. – № 3 (50). – С. 139–142. [in Ukrainian]
3. *Gizburg S.G. Methods of decision of problems on connecting process in electric circuit.* – М.: Vyscha shkola, 1967. – 388 p. [in Russian]
4. *Kotov V.E. Seti Petri.* – М.: Nauka, 1984. – 158 p. [in Russian]

Стаття надійшла 26.01.2012.
Рекомендована до друку
д.т.н., проф. Юрченко М.М.