

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОКОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ МЕЖДУ ГЛАВНЫМИ КОНТАКТАМИ И ШУНТИРУЮЩЕЙ ЦЕПЬЮ С ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМ КЛЮЧОМ ПРИ ОТКЛЮЧЕНИИ ТОКА ГИБРИДНЫМ КОНТАКТОРОМ

Сосков А.Г., д.т.н., Рак Н.О.

Харьковская национальная академия городского хозяйства

Украина, 61002, Харьков, ул. Революции, 12, ХНАГХ, кафедра электротехники

тел.(057) 707-31-11

Виконано аналіз процесу перетікання струму з кола головних контактів в шунтуюче коло з напівпровідниковим ключем з урахуванням впливу на цей процес падінь напруг як на рідкому металевому мостіку, так і "короткій" дузі. Була запропонована фізична модель, що пояснює випадковий процес багатократного перетікання струму з кола контактів в шунтуюче коло при розмиканні ланцюга.

Выволнен анализ процесса перетекания тока из цепи главных контактов в шунтирующую цепь с полупроводниковым ключом с учётом влияния на этот процесс падений напряжений как на жидком металлическом мостике, так и "короткой" дуге. Предложена физическая модель, поясняющая случайный процесс многократного перетекания тока из цепи контактов в шунтирующую цепь при размыкании цепи.

ВВЕДЕНИЕ

В общем случае процесс отключения тока гибридным контактором можно условно разбить на два этапа: первый – размыкание главных контактов (ГК) и перетекание тока нагрузки из их цепи в шунтирующую цепь с полупроводниковым ключом (ПК), второй – запираение ПК (естественное или принуждённое) при расхождении контактов на расстояние, безопасное для электрического пробоя. В данной работе будет исследоваться только первый этап отключения, поскольку второй этап был детально рассмотрен и проанализирован [1, 2, 3].

В гибридном контакторе, так же как и в классическом электромеханическом, в начальный момент размыкания контактов между ними возникает сначала жидкий металлический мостик, переходящий затем в так называемую "короткую" дугу [4, 5] с напряжением 10 – 20 В. Величина последнего определяется материалом контактов [5]. Как правило, гибридные аппараты выполняются таким образом, что полное перетекание тока из цепи контактов в цепь шунтирующего ПК происходит ещё на стадии существования "короткой" дуги.

Анализ перетекания тока из цепи контактов в ПК при условии неизменного тока в цепи неоднократно рассматривался в литературе. Однако исследования проводились при условии, что ток перетекает только под воздействием напряжения "короткой" дуги [4, 6, 7]. Поскольку падение напряжения на жидком мостике до его разрыва превышает пороговое напряжение современного силового полупроводникового прибора (СПП), входящего в состав ПК, то естественно процесс перетекания тока из цепи контактов в шунтирующую цепь начнётся ранее возникновения "короткой" дуги.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью этой работы является исследование токо-

распределения между контактами и шунтирующей цепью с ПК с учётом падений напряжений как на жидком мостике, так и на "короткой" дуге.

Исследование проводится при следующих допущениях:

- коммутируемый аппаратом ток I в течение переходного процесса является неизменным;
- падение напряжения на "короткой" дуге также неизменно и определяется только материалом размыкающихся контактов (например, для меди оно равно 12 В, а для металлокерамических контактов с содержанием серебра порядка 10 В [4, 5]);
- падение напряжения на СПП шунтирующего ключа будет определяться с учётом кусочно-линейной аппроксимации выражения $U_{кл} = U_0 + iR_d$, где U_0 и R_d – пороговое напряжение и динамическое сопротивление СПП соответственно;
- движение размыкающихся контактов равноускоренное;
- падение напряжение на мостике

$$u_M = \frac{U_M}{t_M}, \quad (1)$$

где U_M и t_M – среднестатистические напряжение обрыва и время существования жидкого металлического мостика.

В соответствии с [4] для меди:

$$U_M = 0,65 \cdot 10^{-3} I + 1,2, \quad (2)$$

$$t_M = 0,046 \cdot a^{-0,76} \exp(0,73 \cdot 10^{-3} I) + 0,5 \cdot 10^{-4}, \quad (3)$$

где a – ускорение размыкающихся контактов (m/c^2);
- магнитной связью подводящих проводов с цепями контактов и ПК пренебрегаем.

Правомерность таких допущений показана в [4, 6].

В этом случае эквивалентная электрическая схема гибридного контактора будет иметь вид, представленный на рис. 1.

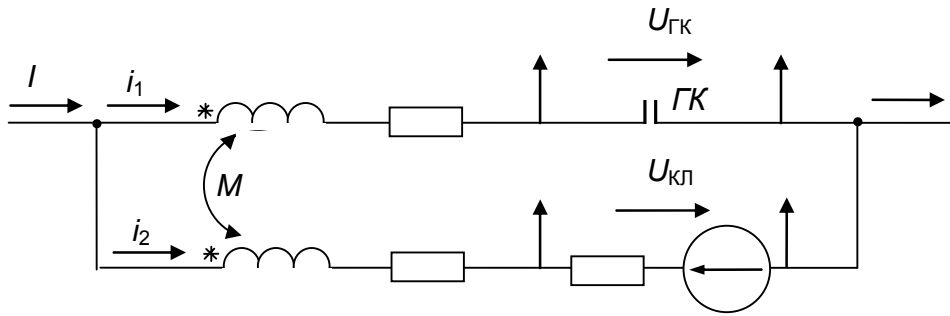


Рис. 1. Эквивалентная электрическая схема гибридного аппарата при размыкании контактов

Из приведенной эквивалентной электрической схемы следует, что момент открывания t_0 СПП ПК определяется выражением

$$t_0 = \frac{U_0 - R_1 I}{U_M} t_M. \quad (4)$$

$$\begin{cases} i_1 + i_2 = I \\ (L_1 - M) \frac{di_1}{dt} - (L_2 - M) \frac{di_2}{dt} + R_1 i_1 - (R_2 + R_d) i_2 + u_K - U_0 = 0 \end{cases}. \quad (5)$$

Проделав преобразования с учётом $u_K = \frac{U_M}{t_M} t$ и

введя обозначения $R_1 + R_d = R_2'$, $\tau = \frac{L_1 + L_2 - 2M}{R_2'}$ и

$L_1 + L_2 - 2M = L$, получим для мостиковой стадии переходного процесса уравнение

$$i_1 = \frac{1}{R_1 + R_2'} \left[U_0 + R_2' I - \frac{U_M}{t_M} (t - \tau) \right] + \left\{ I - \frac{1}{R_1 + R_2'} \left[U_0 + R_2' I - \frac{U_M}{t_M} (t_0 - \tau) \right] \right\} \exp\left(-\frac{(t-t_0)}{\tau}\right). \quad (7)$$

После разрыва жидкого кристаллического мостика между расходящимися контактами загорается дуга, причём, в связи с малым межконтактным промежутком, достигнутым при движении контактов за полное время перетекания тока в шунтирующую ГК цепь, между контактами, как уже указывалось ранее будет существовать "короткая" дуга, напряжение го-

$$i_1 = \frac{U_0 - U_{ДК} + R_2' I}{R_1 + R_2'} + \left[i_1(t_M) - \frac{U_0 - U_{ДК} + R_2' I}{R_1 + R_2'} \right] \exp\left(-\frac{(t-t_M)}{\tau}\right), \quad (9)$$

где $i_1(t_M) = \frac{1}{R_1 + R_2'} \left[U_0 + R_2' I - \frac{U_M}{t_M} (t_M - \tau) \right] + \left\{ I - \frac{1}{R_1 + R_2'} \left[U_0 + R_2' I - \frac{U_M}{t_M} (t_0 - \tau) \right] \right\} \exp\left(-\frac{(t_M-t_0)}{\tau}\right).$ (10)

Время горения дуги определяем из условия полного перетекания тока из цепи контактов в шунтирующую цепь ($i_1 = 0$)

$$t_D = \tau \ln \left[1 - \frac{i_1(t_M)(R_1 + R_2')}{U_0 - U_{ДК} + R_2' I} \right]. \quad (11)$$

Тогда полное время перетекания тока в шунтирующую цепь будет

$$t_{\text{полн}} = t_D + t_M - t_0. \quad (12)$$

Оценка погрешности, вносимой пренебрежением перетеканием тока из цепи контактов в шунтирующую цепь с ПК в мостиковой стадии, проведена с помощью зависимости

$$K_M = \frac{t_{ДК} - t_D}{t_{ДК}} 100\%, \quad (13)$$

В соответствии с [8] процесс перетекания тока в шунтирующую цепь описывается следующей системой уравнений

$$\frac{di_1}{dt} + \frac{i_1}{\tau} = \frac{1}{L} \left[U_0 + R_2' I - \frac{U_M}{t_M} t \right]. \quad (6)$$

Решение данного уравнения с учётом начального условия $i_1(t_0) = I$ будет:

решения которой постоянно: $U_K = U_{ДК}$. При этом, переходный процесс перетекания тока в шунтирующую цепь описывается уравнением

$$\frac{di_1}{dt} + \frac{i_1}{\tau} = \frac{U_0 - U_{ДК} + R_2' I}{L}. \quad (8)$$

Решение уравнения имеет вид

где $t_{ДК}$ – время горения "короткой" дуги без учёта перетекания тока в шунтирующую цепь в мостиковой стадии.

Очевидно, что с помощью этого коэффициента можно также косвенно оценить и долю тока, перетекающую в шунтирующую цепь на стадии существования жидкого мостика.

Время $t_{ДК}$ определяется из уравнения (9) при условиях: $\tau_M = 0$ и $i(0) = I$. Выполнив соответствующие преобразования, получим

$$t_{ДК} = \tau \ln \frac{U_{ДК} - U_0 - R_1 I}{U_{ДК} - U_0 - R_2' I}. \quad (14)$$

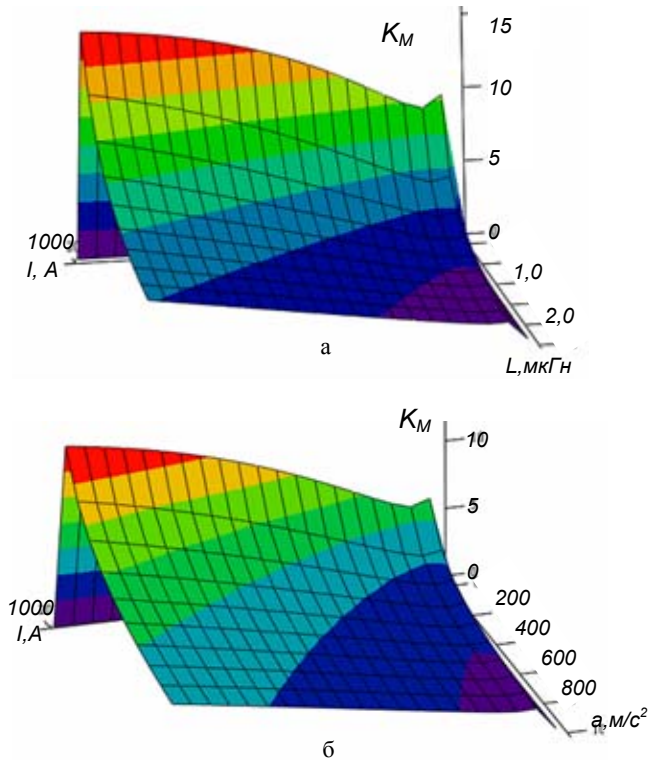
Необходимо также отметить, что выражения (11) и (14) имеют смысл только при выполнении неравенства

$$I > \frac{U_{\text{дк}}}{R_2'} \quad (15)$$

На рис. 2 приведены зависимости K_M от следующих параметров размыкающей цепи:

на рис. 2, а – от I и L при $a = 400 \text{ м/с}^2$ и $R_2' = 3 \text{ МОм}$,

на рис. 2, б – от I и a при $L = 1,0 \text{ мкГн}$ и $R_2' = 3 \text{ МОм}$,



на рис. 2, в – от I и R_2' при $L = 1,0 \text{ мкГн}$ и $a = 400 \text{ м/с}^2$.

При этом предполагалось, что в качестве СПП применён тиристор Т161-160 ($U_0 = 1,15 \text{ В}$, $R_{\text{д}} = 1,41 \text{ МОм}$), ГК выполнены из меди и $R_1 \ll R_2'$.

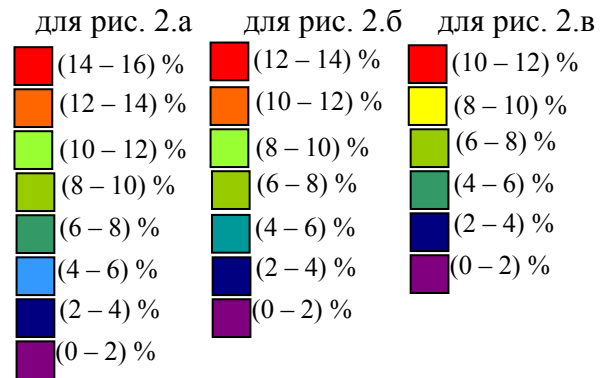
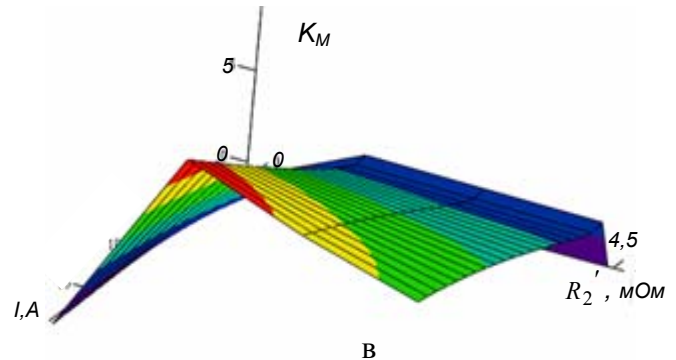


Рис. 2. Графические зависимости коэффициента K_M от следующих параметров: а) $K_M = f(I, L) \Big|_{a, R_2' = \text{const}}$,

б) $K_M = f(I, a) \Big|_{L, R_2' = \text{const}}$, в) $K_M = f(I, R_2') \Big|_{L, a = \text{const}}$

Из зависимостей следует, что величина K_M растёт незначительно с ростом отключаемого тока, существенно снижается с ростом L и a и незначительно с ростом R_2' . При этом при токах свыше 500 А, при индуктивностях 0,5 мкГн и ниже, при ускорениях 200 м/с² и ниже величина этого параметра находится в диапазоне (10 – 20) %. Однако уже при $L \geq 1,0 \text{ мкГн}$, $a \geq 300 \text{ м/с}^2$ и $R_2' \geq 3 \text{ МОм}$ (т.е. при параметрах, характерных для контакторов на $I_{\text{ном}} \geq 100 \text{ А}$ [4]) значение K_M не превышает 5%. Поэтому при разработке сильноточных гибридных контакторов долей перетекаемого тока в ПК на стадии существования жидкого мостика можно пренебречь и расчёт перетекания тока из ГК в ПК вести с помощью выражения (14).

Экспериментальные исследования процесса перетекания тока из цепи контактов в шунтирующую цепь ПК, выполненного на базе встречно параллельно включенных тиристоров подтвердили результаты исследований других авторов [4], состоящие в том, что после почти полного перетекания тока в тиристор возможны повторные металлические замыкания кон-

тактов с возвратом тока, а затем после загорания дуги в процессе дальнейшего расхождения контактов вторичный переход тока в тиристоры. Иногда наблюдается даже трёхкратный переход. В эксперименте использовался гибридный контактор серии КТП-64 на $I_{\text{ном}} = 160 \text{ А}$ с медными главными контактами, включение ПК этого контактора обеспечивалось через вспомогательные контакты от дополнительного источника постоянного напряжения, а главные контакты этого аппарата размыкали активно-индуктивную цепь постоянного тока ($I = 200 \text{ А}$, постоянная времени цепи нагрузки $\tau_H = 5 \cdot 10^{-3} \text{ с}$) при напряжении 24 В. Скорость перетекания тока определялась с помощью пояса Роговского, включённого в шунтирующую цепь, а падение напряжения на главных контактах с помощью делителя напряжения.

На рис. 3 приведены типичные осциллограммы процесса отключения цепи. Исследования многочисленных осциллограмм показали, что форма $\frac{di}{dt}$ имеет биполярный характер, и как видно из осциллограммы,

приведенной на рис. 3, при инициировании дуги после разрыва жидкого металлического мостика ток из цепи ГК перетекает в шунтирующую цепь с полупроводниковым прибором, а затем, при повторном металлическом переключении межконтактного промежутка, ток перетекает обратно в цепь ГК. При этом

момент вторичного металлического замыкания приблизительно совпадает с моментом окончания перетекания тока из цепи контактов в шунтирующую цепь, т.е. с прекращением горения дуги между расходящимися контактами (см. рис. 3).

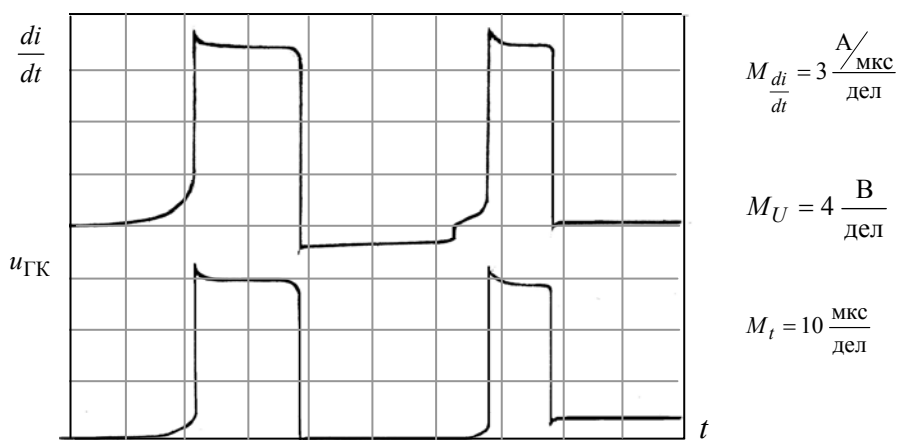


Рис. 3. Осциллограммы скорости перетекания тока в шунтирующую цепь $\left(\frac{di}{dt}\right)$ и напряжения на ГК ($U_{ГК}$) при отключении цепи

По мнению авторов процесс многократного формирования жидких металлических мостиков и дуг размыкания может иметь следующую физическую модель. В начале размыкания контактов в стадиях снятия упругой деформации и формирования жидкого металлического мостика отсутствует существенное перетекание тока из цепи ГК в шунтирующую цепь с ПК (рис. 3). После разрыва жидкого металлического мостика загорается "короткая" дуга, напряжение горения которой, как указывалось ранее, зависит в основном от материала электродов [5]. При этом скорость перетекания тока из цепи контактов в шунтирующую цепь определяется главным образом напряжением горения дуги и параметрами шунтирующей цепи и практически постоянна в течение всего времени существования "короткой" дуги, т.е. определяется в первом приближении выражением $\frac{U_{ДК}}{L}$. Уменьшение тока через дуговой промежуток оказывает влияние на характер и поведение опорных пятен дуги. При быстром остывании расплавленных участков электродов и значительном температурном коэффициенте объёмного расширения возможны большие механические напряжения [9], одним из следствий которых могут быть металлические всплески по следу опорных пятен дуги. Так, например, автор [10] наблюдал всплески металла при скачкообразном передвижении оснований дуги при отключении тока синхронным аппаратом, причём, в некоторых случаях высота всплесков по его данным достигала 0,5 – 0,6 мм. Вероятно, можно ожидать зависимости характера формирования металлических всплесков от скорости перетекания в шунтирующую контакты цепь с ПК, определяющей скорость изменения величины тока через дуговой промежуток, что в свою очередь,

может повлиять на температурный режим основания дуги. При соответствующей высоте всплесков возможно перекрытие межэлектродного промежутка, при этом ток из шунтирующей цепи перетекает обратно в цепь контактов, и второй металлический мостик формируется при дальнейшем расхождении контактов с большей средней скоростью, так как движение контактов мы ранее приняли равноускоренным. Скорость обратного перетекания тока из шунтирующей цепи в цепь ГК, как видно из рис. 3, значительно меньше, чем из цепи ГК в шунтирующую цепь. По мере расхождения контактов создаются условия разрыва второго мостика, после чего инициируется вторая дуга размыкания. Процесс многократного формирования жидкого металлического мостика и дуги размыкания повторяется до тех пор, пока высота металлического всплеска, образующегося после гашения очередной дуги, становится меньше увеличивающегося по мере расхождения контактов межэлектродного промежутка. Очевидно, что рассмотренный процесс усугубляется также разбрызгиванием капель металла из зоны горения дуги и образованием металлических соединений при конденсации паров металла [4].

Как видим процесс возникновения повторных загораний "короткой" дуги при отключении цепи гибридным контактором определяется множеством случайных (закономерность изменения которых учесть практически невозможно) факторов, таких как неоднородность материала контактов, наличие микронеровностей на поверхности контактов, изменяющиеся при многократных размыканиях и замыканиях контактов загрязнения и плёнки, характер образования металлических всплесков по следу опорных пятен дуги и др. и поэтому сам является случайным процессом.

В работе [4] на основании обработки многочисленных результатов экспериментальных исследований процесса отключения цепи гибридным ключом установлено, что среднестатистическое значение числа повторных загораний "короткой" дуги n лежит в диапазоне (1,6 – 2,0), причём, чем выше значение отключаемого тока, тем больше n . В результате среднестатистическое значение времени перетекания тока в шунтирующую цепь можно определить из выражения

$$t_{\text{ср}} = n \cdot t_{\text{полн}}, \quad (16)$$

или без учёта перетекания тока в шунтирующую цепь в мостиковой стадии

$$t_{\text{ср}} = n \cdot t_{\text{ДК}}. \quad (17)$$

ВЫВОДЫ

1. Установлено, что на стадии существования жидкого мостика имеет место перетекания тока в шунтирующую цепь с ПК, выполненным на базе современных СПП. При этом доля этого тока растёт незначительно с ростом отключаемого тока и существенно падает с ростом индуктивности L и активного сопротивления R'_2 шунтирующей цепи и ускорения размыкающихся контактов a .

2. Показано, что при отключаемых токах свыше 500 А при индуктивности $L \leq 0,5 \text{ мкГн}$ и при ускорениях $a \leq 200 \text{ мс}$ и при $R'_2 \leq 3 \text{ мОм}$ перетекающего тока на стадии существования жидкого мостика может достигать 20% и даже более. Однако, уже при $L \geq 1,0$, $a \geq 300 \text{ м/с}^2$ и $R'_2 \leq 3 \text{ мОм}$, т.е. при параметрах, характерных для контакторов на номинальные токи $I_{\text{ном}} \geq 100 \text{ А}$, доля этого тока становится незначительной (менее 5%) и поэтому может не учитываться при их разработке.

3. Предложена физическая модель процесса перетекания тока в шунтирующую цепь, поясняющая возможность повторных металлических замыканий в цепи ГК в результате возникновения игл на поверхности контактов по ходу пятен "короткой" дуги из-за большой скорости спада тока в её цепи. При этом показано, что этот процесс носит случайный характер.

4. Анализ предложенных выражений для расчёта влияния перетекания тока в шунтирующую цепь показывает, что для его уменьшения необходимо повышать напряжение в цепи "короткой" дуги путём изменения материала контактов либо их конструкции, снижать индуктивность и активное сопротивление шунтирующей цепи, а также повышать скорость размыкания ГК.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Сосков А.Г., Соскова И.А. Полупроводниковые аппараты: коммутация, управление, защита. Учебник (под ред. А.Г. Соскова). – К: Каравелла, 2005. – 344 с.
 [2] Рак Н.О. Токовая нагрузка на силовые полупроводниковые приборы гибридных коммутационных полупроводниковых аппаратов переменного тока в нормальных режимах работы. Коммунальное хозяйство городов. Научно-технический сборник.- Киев: "Техника", 2007 г., Выпуск 76.- С. 304-310.

[3] Рак Н.О. Анализ токовой нагрузки на силовые полупроводниковые приборы гибридных коммутационных полупроводниковых аппаратов переменного тока в аварийных режимах работы. Восточно-европейский журнал передовых технологий. – Харьков, Технологический центр, 2007, № 313 (27). – С. 15–18.
 [4] Могилевский Г.В. Гибридные электрические аппараты низкого напряжения. М.: Энергоатомиздат, 1986.– 232 с.
 [5] Хольм Р. Электрические контакты. Пер. с англ. Под ред. Брускина П.Э., Рудницкого А.А. – М.: изд-во иностранной литературы, 1961. – 464 с.
 [6] Глебова Е.Г. Исследование электрического износа контактов в аппаратах с бездуговым размыканием. – Дис... канд. техн. наук. – Харьков, 1978. – 202 с.
 [7] Омельченко В.Т. Теория процессов на контактах. – Харьков.: Вища школа. Изд-во при Харьковском университете. 1979. – 126 с.
 [8] Основы теории цепей: Учебник для вузов / Г.В. Зевеке, П.А. Ионкин, А.В. Нетушил, С.В. Страхов. – 5-е изд., перераб.– М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с., ил.
 [9] Никифоровский Н.Н. О коммутации тока при размыкании одной из двух параллельных цепей электрических аппаратов. – Электричество, 1959, №12, С. 70–74.
 [10] Кузнецов В.Н. Исследование восстанавливающейся электрической прочности межконтактных промежутков в условиях синхронного отключения. – Дис... канд. техн. наук. – М., 1975. – 197 с.

Поступила 10.11.2007