© А.С. Залогин, О.Б. Малкович, 2006

УДК 621.372

А.С. Залогин, О.Б. Малкович

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАЗРЯДОВ РАЗМЫКАНИЯ ИНДУКТИВНЫХ ЦЕПЕЙ

Влияние параметров линейных индуктивных цепей на искробезопасность экспериментальным путем исследовано достаточно полно и построены характеристики искробезопасности для этих цепей. Подключение шунтирующих индуктивность элементов, например, диода или стабилитрона, уже не позволяет использовать указанные характеристики искробезопасности для определения значений искробезопасного тока. При этом влияние индуктивности, тока и напряжения цепи на характеристики разряда не определено.

Рассмотрим переходные процессы в цепи при возникновении разряда и определим зависимость тока разряда от времени, длительности разряда и выделяемую в разряде энергию. Вольтамперную характеристику разряда принимаем такой же, как и при исследовании безреактивных цепей. Переходные процессы при размыкании индуктивной цепи определяются уравнением:

$$E = U_p + i_p R_н + L\frac{di_p}{dt}, \qquad (1)$$

где i_p - ток разряда; U_p - напряжения на разряде; t - время; L - индуктивность; $R_н$ - сопротивление; E - ЭДС.

Подставляя в это уравнение выражение $U_p = U_o + at + \frac{bt}{i_p}$, получим:

$$\frac{di_p}{dt} = \frac{E - U_o - at - \frac{bt}{i_p} - i_p R_н}{L}, \qquad (2)$$

где U_o - катодное падение напряжения; a и b – коэффициенты.

Аналитическое решение этого нелинейного дифференциального уравнения затруднено. Для решения этого уравнения численными методами применяем метод Рунге-Кутта, согласно которому находим:

$$K_1 = f(t_n, i_n)$$

$$K_2 = f(t_n + \frac{\Delta t}{2}; i_n + \frac{\Delta t K_1}{2})$$

$$K_3 = f(t_n + \frac{\Delta t}{2}; i_n + \frac{\Delta t K_2}{2})$$

$$K_4 = f(t_n + \frac{\Delta t}{2}; i_n + \Delta t K_3)$$

$$i_{n+1} = i_n + \frac{\Delta t}{6}(K_1 + 2K_2 + 2K_3 + K_4),$$

где K_1, K_2, K_2, K_4 - вспомогательные коэффициенты, tn - время на n-ом шаге расчета, i_n - ток на n-ом шаге по времени.

Разряд прекращается при уменьшении тока до нуля. Производятся расчеты тока разряда, напряжения на разряде, энергии, выделяемой в разряде.

Переходные процессы в цепи, содержащей диодные или стабилитронные шунты, характеризуются тем, что при изменении знака напряжения на зажимах шунта и достижения этим напряжением величины, при которой шунтирующий диод или стабилитрон открывается, происходит прекращение разряда. При наличии у индуктивных элементов шунтов условием прекращения разряда служит не уменьшение тока до нуля, а достижение на разряде напряжения:

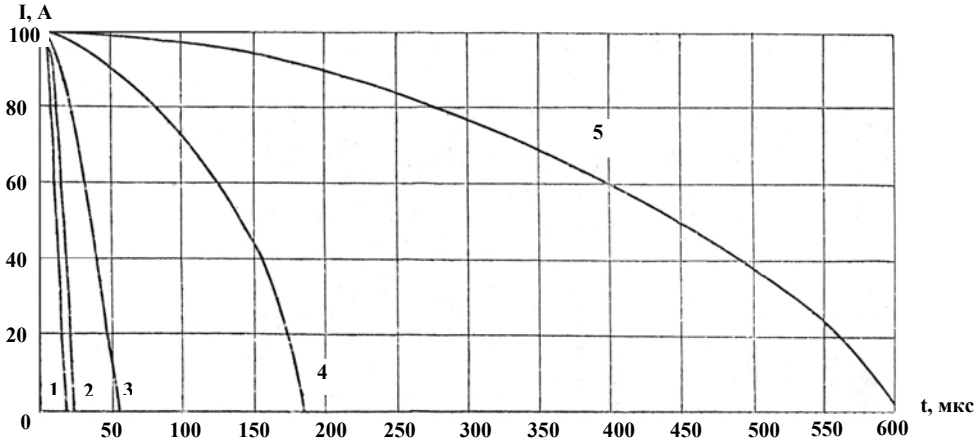
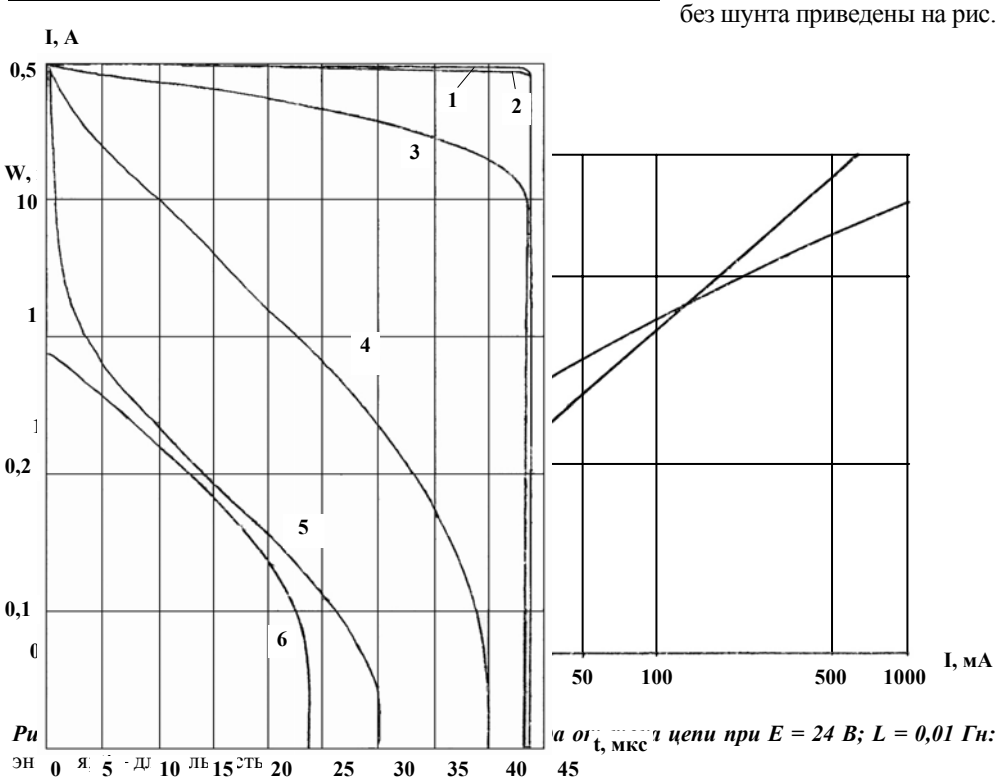


Рис. 1. Зависимость тока разряда от времени и индуктивности для индуктивной цепи без шунта I = 0,5 А, U = 24 В 1. L = 1·10^{-4} Гн; 2. L = 1·10^{-3} Гн; 3. L = 1·10^{-2} Гн; 4. L = 1·10^{-1} Гн; 5. L = 1 Гн

$$Up = E + Uш. \qquad (3)$$

До момента открывания шунтирующего элемента переходные процессы в цепи с шунтом не отличаются от переходных процессов в индуктивной цепи без шунта.

Расчетные зависимости величины тока разряда от времени для индуктивной цепи без шунта приведены на рис. 1.



***Ри** ... **а от** ... **цепи при E = 24 В; L = 0,01 Гн:** 1 –*

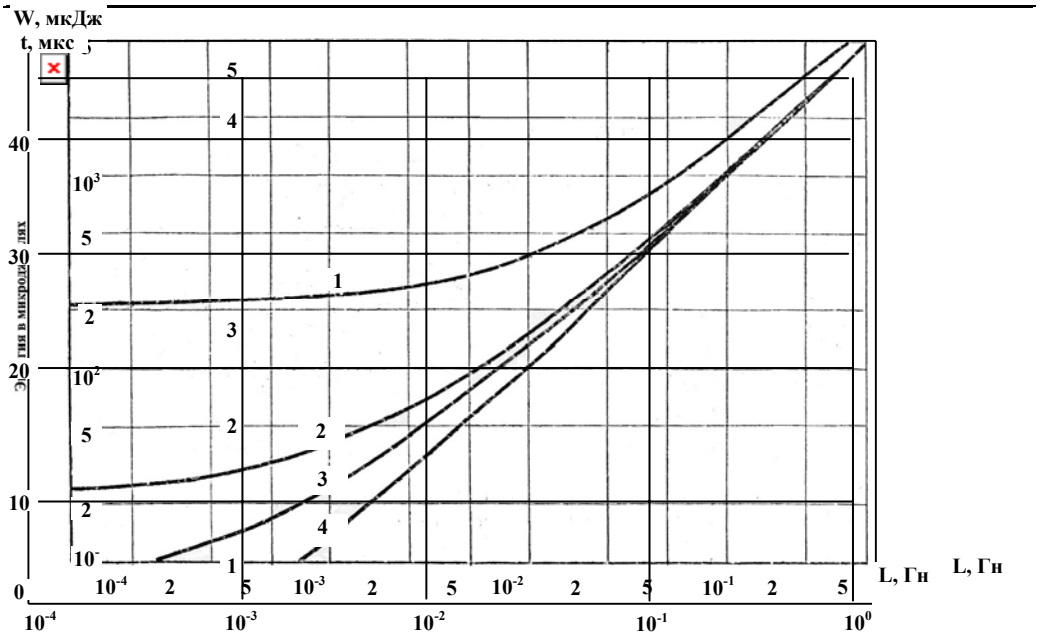


Рис. 3. Зависимость энергии разряда от напряженности и индуктивности при I = 0,1 А: *1* – 100 В; *2* – 36 В; *3* – 24 В; *4* – 12 В

Рис. 5. Зависимость длительности разряда от индуктивности и тока индуктивной цепи с диодным шунтом при U = 24 В: *1* – I = 0,005А; *2* – I = 0,05А; *3* – I = 0,1А; *4* – I = 0,5А; *5* – I = 1 А

Ток коммутируемой цепи был выбран равным I = 0,5 А**,** напряжение E = 24 В, а индуктивность менялась в пределах от 10^{-4} до 1 Гн. При этом длительность электрического разряда изменялась от 15 до 600 мкс, а энергия, выделяемая в разряде, от 8,6 мкДж до 5140 мкДж. Характер формы кривой тока разряда, полученной расчетным и экспериментальным путями [1], совпадают. На рис. 2 приведены зависимости энергии и длительности разряда от коммутируемого тока.

Рис. 4. Зависимость тока разряда от времени и индуктивности цепи E = 24В; I = 0,5 А:
1 – L = 1 Гн; *2* – L = 0,1 Гн; *3* – L = 0,01 Гн; *4* – L = 0,001 Гн; *5* – L = $1 \cdot 10^{-4}$ Гн; *6* – L = 0

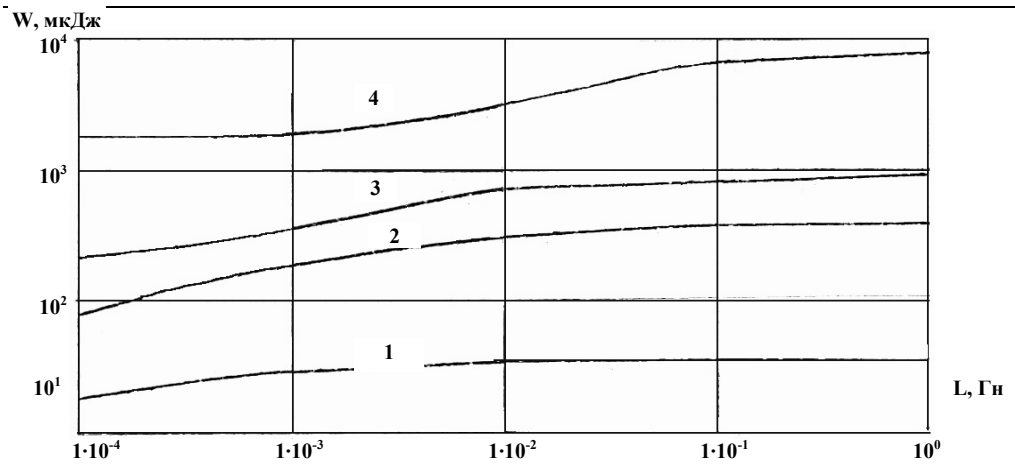


Рис. 7. Зависимость энергии индуктивности и напряжения при I = 0,5 А: *1* – U = 12 В; *2* – U = 24 В; *3* – U = 36 В; *4* – U = 100 В

Как следует из приведенных зависимостей, ток разряда оказывает существенное влияние на длительность разряда и выделяемую в нем энергию. Основная часть энергии в разряд поставляется (при $L > 10^{-2}$ Гн) энергией индуктивного элемента, если ток в цепи превышает 50 мА. На рис. 3 приведены зависимости величины энергии, выделяемой в разряде, от индуктивности и напряжения цепи.

С увеличением индуктивности влияние напряжения на величину выделяемой в

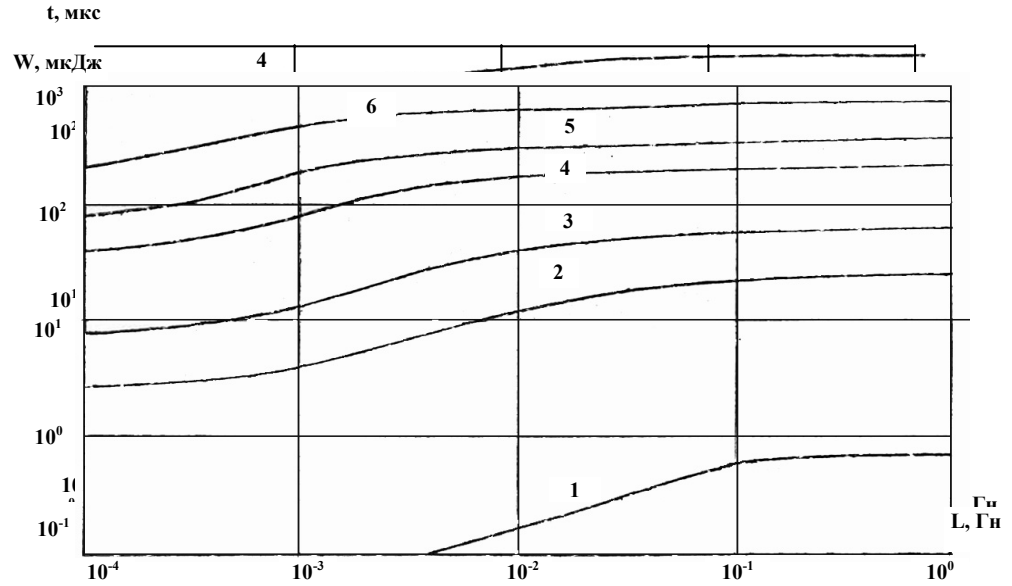


Рис. 6. Зависимость длительности разряда от индуктивности и напряжения индуктивной цепи с диодным шунтом при I = 0,5 А: *1* – U = 12 В; *2* – U = 24 В; *3* – U = 36 В; *4* – U = 100 В

Рис. 8. Зависимость энергии индуктивности и тока при U = 24 В: *1* – L = $5\cdot10^{-3}$ А; *2* – L = $5\cdot10^{-2}$ А; *3* – I = 1,0А; *4* – I = 0,3А; *5* – I = 0,5А; *6* – I = 1,0А

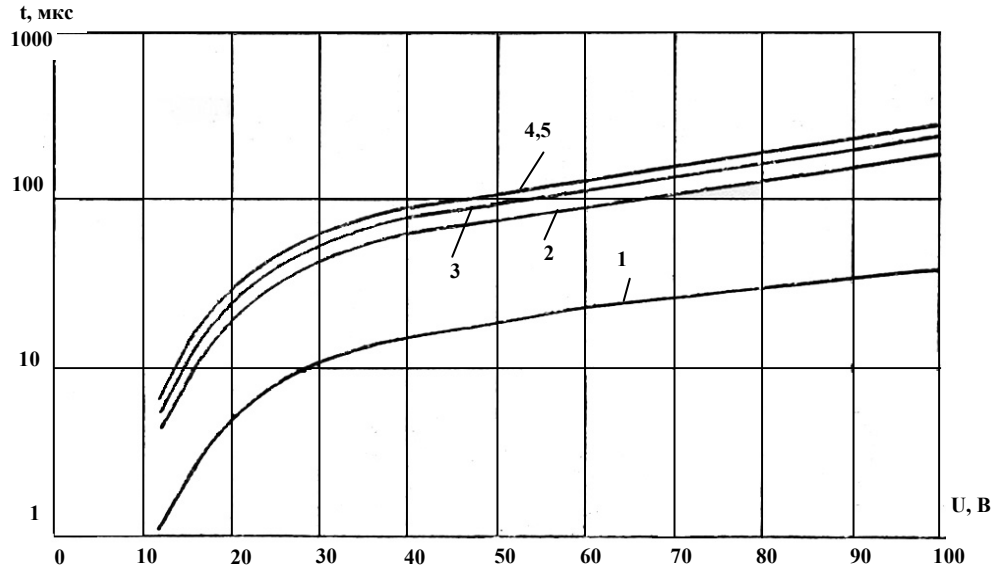


Рис. 9. Зависимость длительности разряда от напряжения и тока при L = 1 Гн: *1* – I = 5·10^{-3}А; *2* – I = 5·10^{-2}А; *3* – I = 0,1А; *4* – I = 0,5А; *5* – I = 1А

разряде энергии уменьшается. Из анализа характеристик искробезопасности для индуктивных цепей также следует, что с увеличением индуктивности напряжение не оказывает существенного влияния на величину искробезопасного тока, т.е. полученные расчетным путем зависимости согласуются с экспериментом.

При шунтировании индуктивной нагрузки диодным шунтом на контактах не возникает перенапряжений (как и при коммутации безреактивной цепи), а максимальный ток разряда не превышает тока в цепи до ее коммутации. Однако, как показывают испытания на искробезопасность, искробезопасная мощность индуктивной цепи с диодным шунтом значительно меньше, чем безреактивной цепи. Уменьшение величины искробезопасной мощности объясняется тем, что при размыкании индуктивной цепи ток разряда уменьшается меньше, чем при размыкании безреактивной цепи. На рис. 4 приведены зависимости тока разряда от времени при различной индуктивности цепи. На этом же рисунке приведена зависимость тока разряда от времени при размыкании безреактивной цепи (кривая 6).

В обоих случаях коммутировалась цепь с током I = 0,5 А и напряжением U = 24 В. Если при размыкании безреактивной цепи ток в начале разряда уменьшался скачком до 0,275 мА, то при наличии индуктивности ток в начале разряда был равен коммутируемому, а затем плавно уменьшался. С увеличением индуктивности до 0,1 Гн и выше ток изменяется настолько мало, что практически равен коммутируемому в тот момент, когда напряжение на разряде достигнет ЭДС источника и разряд прекратится.

С увеличением индуктивности увеличивается не только средний ток разряда, но и его длительность. Однако такое увеличение происходит при увеличении индуктивности до определенного предела. Так, при L = 0 Гн (безреактивная цепь), $L = 10^{-4}$ Гн, $L = 10^{-3}$ Гн, $L = 10^{-2}$ Гн, $L = 10^{-1}$ Гн и L = 1,0 Гн длительность разряда соответственно равна 23 мкс, 30 мкс, 40 мкс, 43 мкс, 43,5 мкс.

Зависимости длительности электрического разряда от величины индуктивности и коммутируемого тока для цепи с напряжением 24 В приведены на рис. 5.

Как следует из приведенных зависимостей, при различных значениях тока индуктивность, достигая определенного значения, перестает оказывать влияние на длительность электрического разряда, причем, чем больше величина тока, тем меньшая величина индуктивности перестает оказывать влияние на длительность электрического разряда.

При постоянной величине тока I = 0,5 А, индуктивность также оказывает влияние (при сравнительно малых ее значениях) на длительность разряда (рис. 6). В этом случае при увеличении напряжения увеличивается и индуктивность, при которой она перестает оказывать влияние на длительность разряда.

На рис. 7 и 8 приведены зависимости величины энергии, выделяемой в электрическом разряде от индуктивности при различных значениях напряжения и тока. Индуктивность оказывает такое же влияние на энергию разряда, как и на его длительность, а именно, при малых значениях индуктивности ее изменение оказывает влияние на энергию разряда, а с увеличением индуктивности ее влияние на величину энергии разряда уменьшается. С увеличением напряжения цепи увеличивается, как следует из зависимостей, приведенных на рис. 6 и величина индуктивности, при которой прекращается ее влияние на разряд. При увеличении тока в цепи предельное значение индуктивности, оказывающей влияние на разряд, уменьшается.

Таким образом, независимо от тока и напряжения цепи, при достаточно большой индуктивности, длительность разряда и величина выделяемой в разряде энергии не зависит от величины индуктивности и определяется только током и напряжением цепи. На рис. 9 приведена зависимость длительности разряда от напряжения цепи при изменении тока от 5·10-3 А до 1 А при индуктивности 1 Гн.

Как следует из приведенных зависимостей, с увеличением тока уменьшается его влияние на длительность разряда. Так, при токе 0,5 А и 2 А длительность разряда

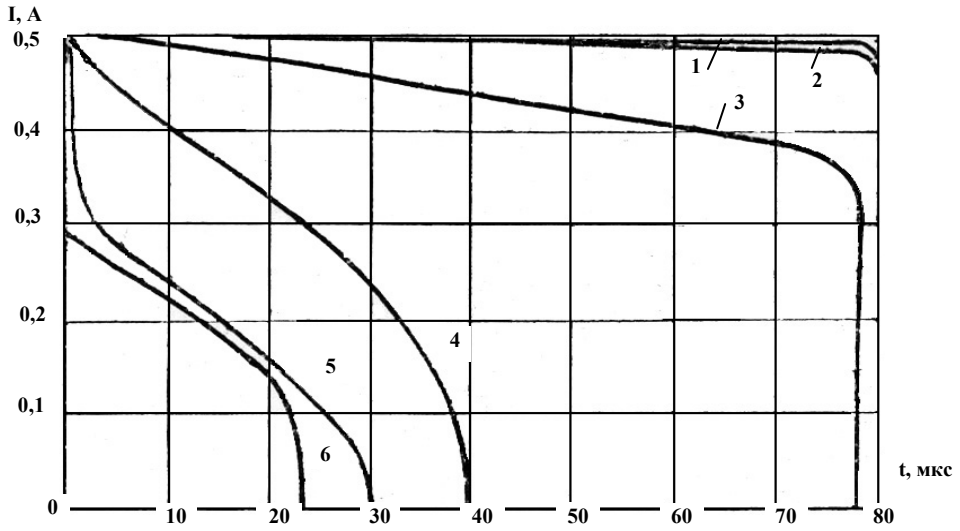


Рис. 10. Зависимость тока разряда от времени и индуктивности цепи: со стабилитронным шунтом при E = 24В; I = 0,5А; $U_{ст}$= 0,5E: *1* – L = 1 Гн; *2* – L = 0,1 Гн; *3* – L = 0,01 Гн; *4* – L = 10^{-3} Гн; *5* – L = 10^{-4} Гн; *6* – L = 0

одинакова и зависит только от напряжения цепи (при заданных параметрах вольтамперной характеристики разряда).

При шунтировании индуктивной цепи стабилитронным шунтом длительность электрического разряда и величина выделяемой в разряде энергии увеличивается по сравнению с длительностью и энергией разряда, возникающего при размыкании индуктивной цепи с диодным шунтом. На рис. 10 приведены зависимости тока от времени при различных значениях индуктивности.

Параметры цепи I = 0,5 А, E = 24 В, Uст = 0,5 E. Сравнивая расчетные зависимости тока от времени, полученные для индуктивной цепи с диодным (рис. 4) и стабилитронным (рис. 10) шунтами, можно сделать вывод, что даже при Uст = 0,5E, т.е. при максимальном напряжении на разряде, не превышающем 1,5E, длительность разряда увеличивается с 43 до 78 мкс, т.е. почти в два раза.

Определение влияния тока, напряжения, индуктивности цепи, а также степени ее шунтирования на длительность разряда и выделяемую в нем энергию позволяет выбирать наиболее опасные режимы при испытаниях электрических цепей на искробезопасность, а также оценивать эффективность мер по обеспечению искробезопасности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Коган Э.Г.* Вопросы оценки и обеспечения искробезопасности аппаратуры автоматизации горных машин. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – М., 1972. – 16 с. – Московский горный институт.

Коротко об авторах

Залогин А.С. – кандидат технических наук, исполнительный директор Некоммерческой автономной организации «Центр по сертификации взрывозащищенного и рудничного электрооборудования (ЦСВЭ)»,
Малкович О.Б. – инженер.

© А.С. Залогин, 2006

УДК 621.372

А.С. Залогин

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАЗРЯДОВ РАЗМЫКАНИЯ БЕЗРЕАКТИВНЫХ ЦЕПЕЙ

Теоретические исследования электрических разрядов проводятся, прежде всего, с целью определения соответствия принятой модели разряда реальным процессам [1], а также для определения влияния параметров цепи и искрообразующего механизма, рекомендованного МЭК [2, 3], на факторы, определяющие искробезопасность цепи, в частности, на энергию и длительность разряда, и сравнения полученных результатов с экспериментальными.

Запишем систему уравнений, определяющих ток, напряжение и энергию разряда и их изменение во времени:

$$\begin{cases} U_p = E - i_p R_н \\ U_p = U_o + at + \dfrac{bt}{i_p} \\ W = \int\limits_0^{tp} i_p U_p dt \end{cases} \qquad (1)$$

В результате решения, этой системы уравнений находим:

$$i_p = \frac{E - U_o - at + \sqrt{(E - U_o - at)^2 - 4R_н bt}}{2R_н} \qquad (2)$$

$$U_p = \frac{E + U_o + at - \sqrt{(E - U_o - at)^2 - 4R_н bt}}{2} \qquad (3)$$

Приравнивая подкоренное значение одного их этих выражений, определим длительность разряда:

$$t_p = \frac{a(E - U_o) + 2R_н b - \sqrt{(a(E - U_o) + 2R_н b)^2 - a^2(E - U_o)^2}}{a^2} \qquad (4)$$

а подставляя (2), (3) и (4) в последнее уравнение системы (1), получим выражение для выделяемой в разряде энергии:

$$Wp = \frac{1}{2R_н}\left(tU_o(E - U_o) + \frac{at^2}{2}(E - 2U_o) - \frac{a^2t^3}{3}\right) + \frac{bt^2}{2} + \frac{\left(\sqrt{(E - U_o - at)^2 - 4R_н bt}\right)^3 - (E - U_o)^3}{6R_н a} + \frac{b}{2a^2}\left(E - U_o + \frac{R_н b}{a}\right)\left(\frac{(E - U_o)(E - U_o + \frac{2R_н b}{a})}{2\frac{R_н b}{a}(E - U_o + \frac{R_н b}{a})} - \frac{(N + \frac{2R_н b}{a})\sqrt{N^2 - 4R_н bt}}{2\frac{R_н b}{a}(E - U_o + \frac{R_н b}{a})} + \ln\frac{R_н b}{a(E - U_o + \frac{R_н b}{a})} - \ln\frac{N + \frac{2R_н b}{a} - M}{N + \frac{2R_н b}{a} + M}\right) \qquad (5)$$

где $N = E - U_o - at$; $M = \sqrt{N^2 - 4R_н bt}$.

При аналитическом исследовании разрядов определялись:

- зависимости тока разряда от времени при размыкании цепи с различными напряжениями;
- зависимости длительности и энергии разряда от тока и напряжения цепи равной мощности;
- зависимости энергии, выделяемой в разряде, от тока и напряжения цепи;
- зависимость тока от напряжения цепи при одинаковой величине выделяемой в разряде энергии.

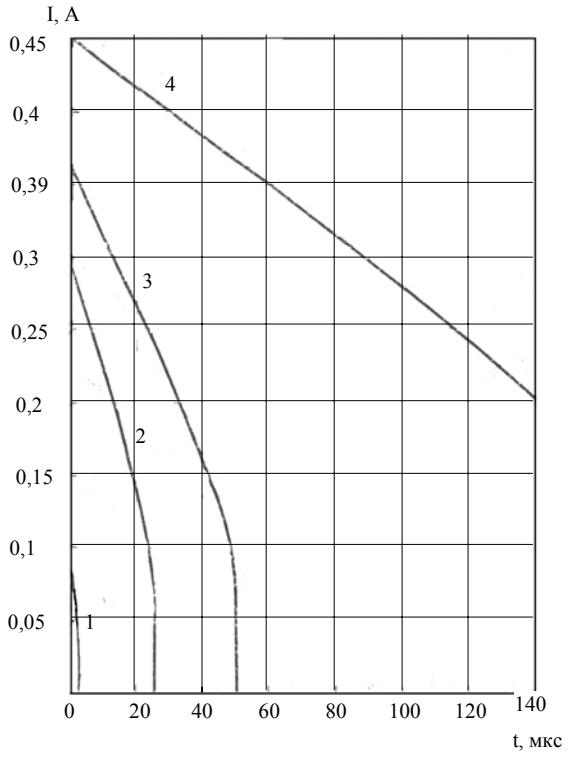


Рис. 1. Зависимость разряда от времени и напряжения для безреактивной цепи при размыкании тока I = 0,5 А: *1* – E = 12 В; 2 – E = 24 В; 3 – E = 36 В; 4 – E = 100 В

Коэффициенты *a* и *b* определялись из осциллограммы наиболее типичного электрического разряда при размыкании цепи с параметрами E = 24 В, I = 0,5 А. Значения коэффициентов $a = 3{,}13 \cdot 10^5$ В/с, $b = 7{,}81 \cdot 10^3$ В·А/с.

Расчетные зависимости тока разряда от времени при напряжениях цепи 12, 24, 36 и 100 В (при токе 0,5 А) приведены на рис. 1.

Как следует из приведенных зависимостей, в начале разряда ток скачкообразно уменьшается до некоторой величины *Iнач*., а затем происходит его плавное уменьшение до величины *Iпр*. Причем, величина *Iпр* находится в пределах $0 < Iпр < (E\text{-}Uo)/2R$, что наблюдается и при экспериментальных исследованиях.

На рис. 2 приведены зависимости длительности и энергии разряда от тока коммутируемой цепи при ее мощности 2,5; 5; 10 и 20 Вт.

Как следует из приведенных зависимостей, величина мощности оказывает существенное влияние на величину выделяемой в разряде энергии и длительность разряда. Так, при токе 0,2 А длительность разряда при коммутации цепи с мощностью 2,5; 5; 10 и 20 Вт соответственно равна 1,8; 18; 63 и 139 мкс. При этом энергия разряда соответственно равна 0,7; 22; 150 и 568 мкДж. Из этого следует, что последующее увеличение мощности в два раза с 2,5 до 5 Вт, с 5 до 10 Вт и с 10 до 20 Вт приводит к увеличению энергии соответственно в 31; 6,8 и 3,8 раза, т.е. с увеличением мощности цепи, при неизменном значении тока, ее влияние на длительность и энергию разряда уменьшается. Поскольку при этом ток не изменяется, то это значит, что с увеличением напряжения уменьшается его влияние на длительность и энергию разряда.

Зависимости, определяющие влияние напряжения на длительность и энергию разряда, приведены на рис. 3.

Напряжение от 10 В до 20 В оказывает большое влияние на длительность и энергию разряда, а при напряжении от 30 В до 40 В это влияние уменьшается. Из характера зависимостей энергии, выделяемой в разряде при коммутации цепей различной мощности, следует, что увеличение искробезопасной мощности в таких цепях целесообразно производить за счет увеличения тока, а не напряжения цепи.

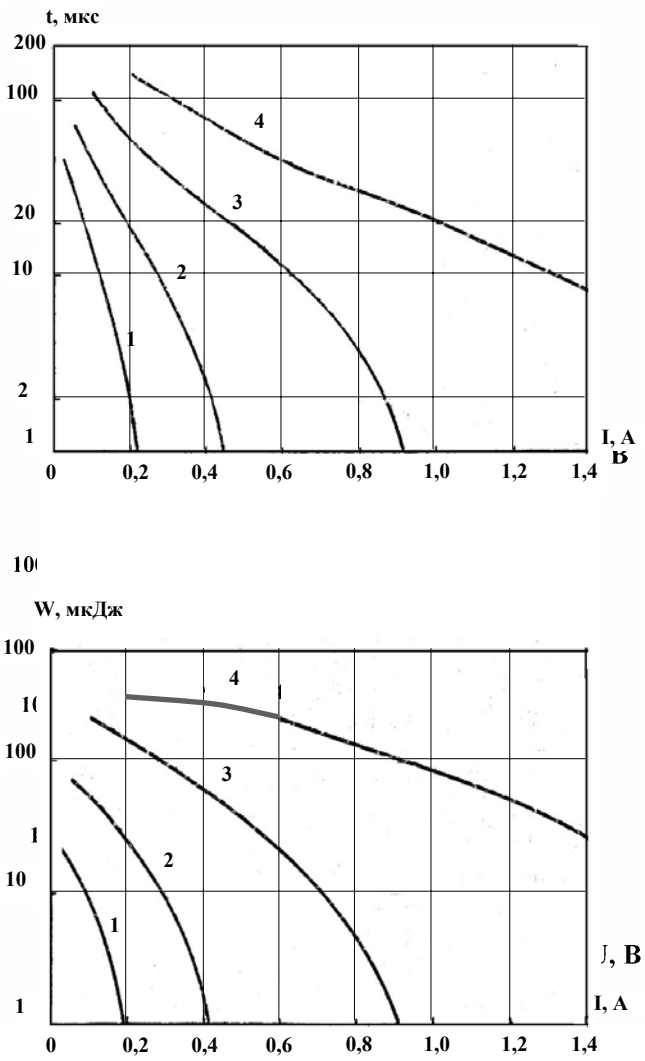


Рис. 2. Зависимости длительности и энергии разряда от тока и мощности коммутируемой цепи: *1* – P = 2,5 Вт.; *2* – P = 5 Вт.; *3* – P = 10 Вт; *4* – P = 20 Вт

Так, допустим, цепь с напряжением 20 В имеет мощность 5 Вт (кривая 2 рис. 3) и требуется увеличить мощность до 10 Вт (кривая 3). Этой мощности при неизменном напряжении соответствует точка С кривой 3, а величина выделяемой энергии W_1 при этом увеличивается в два раза. При увеличении напряжения в два раза (при неизменном токе) величина выделяемой в разряде энергии определяется по кривой 3 в точке ее пересечения с ординатой, соответствующей напряжению 40 В. Поскольку $W_1 < W_2$, то увеличение тока приводит к меньшему увеличению энергии в разряде, чем соответствующее увеличение напряжения.

В данном случае, при принятых в расчете коэффициентах *a* и *b,* увеличение тока в два раза, приводящее к увеличению мощности цепи от 5 до 10 Вт, приводит (при напряжении 20 В) к увеличению энергии с 14,7 до 37 мкДж, т.е. в 2,5 раза, а при неизменном токе и таком же увеличении мощности, за счет соответствующего увеличения напряжения, приводит к увеличению энергии - с 14,7 до 107 мкДж, т.е. в 7,3 раза. Аналогичное влияние оказывает ток и напряжение коммутируемой цепи на длительность разряда.

Проведен расчет величины энергии, выделяемой в разряде при изменении напряжения от 12 В до 500 В и тока от 3 А до 5 мА. По результатам расчета построены зависимости, приведенные на рис. 4.

По этим данным можно получить зависимости величины тока от напряжения, при которых выделяемая в разряде энергия остается постоянной. Если предположить, что при постоянной энергии разряда газовая смесь воспламеняется с одинаковой вероятностью, то при выборе соответствующего значения энергии зависимость тока от напряжения безреактивной цепи должна совпадать с характеристикой искробезопасности, приведенной в [2, 3].

На рис. 5 показаны зависимости токов от напряжений при выделении в разряд энергии, равной соответственно 100, 160 и 280 мкДж, а также характеристика искробезопасности для метановоздушной газовой смеси (кривая 2). При W_p = 160 мкДж зависимость тока от напряжения полностью совпадает с этой характеристикой. Следует отметить, что величина энергии W_p= 160 мкДж является меньшей, чем минимальная энергия воспламенения (W = 280 мкДж), которая, как известно, определялась по другой методике, согласно которой энергия в разряде выделялась практически мгновенно.

На этом же рисунке приведена также зависимость тока от напряжения разряда при выделении в нем энергии 10, 15 и 20 мкДж. Здесь же приведена характеристика искробезопасности для водородовоздушной смеси (кривая 5). Эта характеристика в диапазоне напряжений от 15 В до 150 В идет параллельно кривым, соответствующим энергиям 15 и 20 мкДж, т.е. соответствует зависимости напряжения от тока при энергии порядка 17-18 мкДж. При уменьшении напряжения ниже 15 В характеристика искробезопасности идет ниже этой кривой, а при напряжении выше 150 В - выше. Особенно большое отличие наблюдается при напряжениях близких к U_o, где величина тока достигает единиц ампер.

Это, вероятно, объясняется тем, что при таких токах в разряде увеличивается энергия, выделяемая за счет нагрева и горения материала контактов, а эти процессы при расчете не учитывались. Эти явления проявляются при использовании водородовоздушной смеси, которой достаточно для воспламенения значительно меньше энергии. При увеличении напряжения свыше 150 В, где воспламеняющие токи уменьшаются до десятков миллиампер, устойчивый дуговой разряд не может существовать, а следовательно нельзя использовать применяемую модель разряда. Этим можно объяснить отклонение расчетных зависимостей от характеристики искробезопасности.

Таким образом, несмотря на то, что при расчете были приняты такие допущения как независимость коэффициентов ударной и тепловой ионизации от параметров цепи и постоянство скорости коммутируемых контактов, характеристики искробезопасности практически совпадают с аналитическими зависимостями тока разряда от напряжения при определенной величине выделяемой в разряд энергии.

Рис. 3. Зависимости длительности и энергии разряда от напряжения и мощности коммутируемой цепи: *1* – P = 2,5 Вт; *2* – P = 5 Вт; *3* – P = 10 Вт; *4* – P = 20 Вт

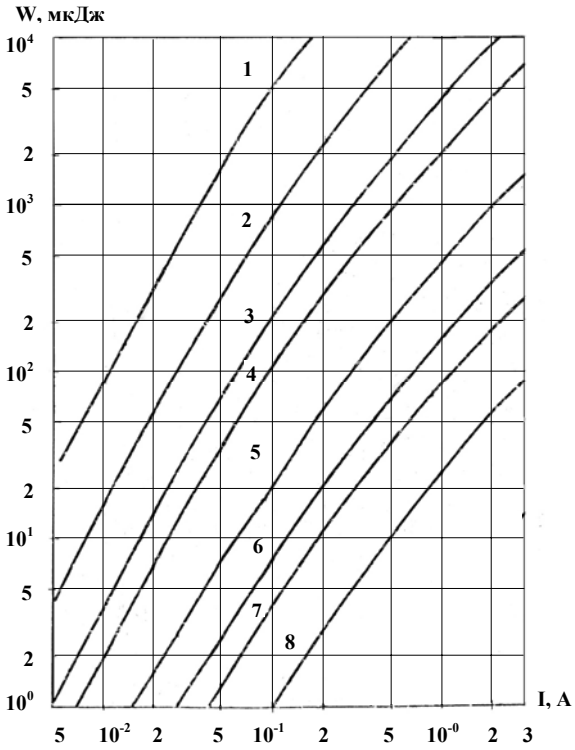


Рис. 4. Зависимость энергии разряда от напряжения и тока безреактивной цепи: *1* – U = 500В; *2* – U = 200В; *3* – U = 100 В; *4* – U = 70 В; *5* – U = 36 В; *6* – U = 24 В; *7* – U = 15 В; *8* – U = 12 В

Поскольку параметры искрообразующего механизма, в частности скорость движения контактов, оказывает существенное влияние на характеристику разряда, было проведено исследование влияния скорости на длительность разряда и выделяемую в разряде энергию. Скорость задавалась следующим образом: коэффициенты *a* и *b*, которые содержат в качестве сомножителя скорость, были в одном случае одновременно увеличены, а в другом случае уменьшены относительно базового варианта, в котором относительные значения коэффициентов принимались равными единице. Зависимость величины длительности разряда и выделяемой в нем энергии от относительных значений коэффициентов *a* и *b* при напряжении 24 В и токе 0,5 А приведены в таблице.

Как следует из данных, приведенных в таблице, с увеличением скорости пропорционально уменьшается длительность и энергия разряда.

На величину выделяемой в разряде энергии оказывает влияние также соотношение между коэффициентами ударной и тепловой ионизации. На рис. 6 приведены зависимости величины энергии, выделяемой в разряде, и длительности разряда от коэффициента ударной ионизации *a* при неизменном значении коэффициента тепловой ионизации *b*, а на рис. 7 аналогичные зависимости от коэффициента *b* при неизменном значении *a*. Как следует из приведенных зависимостей, изменение коэффициента *a* оказывает большее влияние на длительность разряда и выделяемую в разряде энергию, чем соответствующее изменение коэффициента *b*. Полученные зависимости позволяют оценить изменение величины выделяемой в разряде энергии, если при изменении параметров цепи или искрообразующего механизма изменяются коэффициенты ударной и тепловой ионизации.

a	0,1	0,25	0,5	1	2,5	5	10
b	0,1	0,25	0,5	1	2,5	5	10
$T_р$, мкс	251,2	100,48	50,24	25,12	10	5,02	2,51
$W_р$, мкДж	675,7	270,3	135,1	67,6	27	13,5	6,75

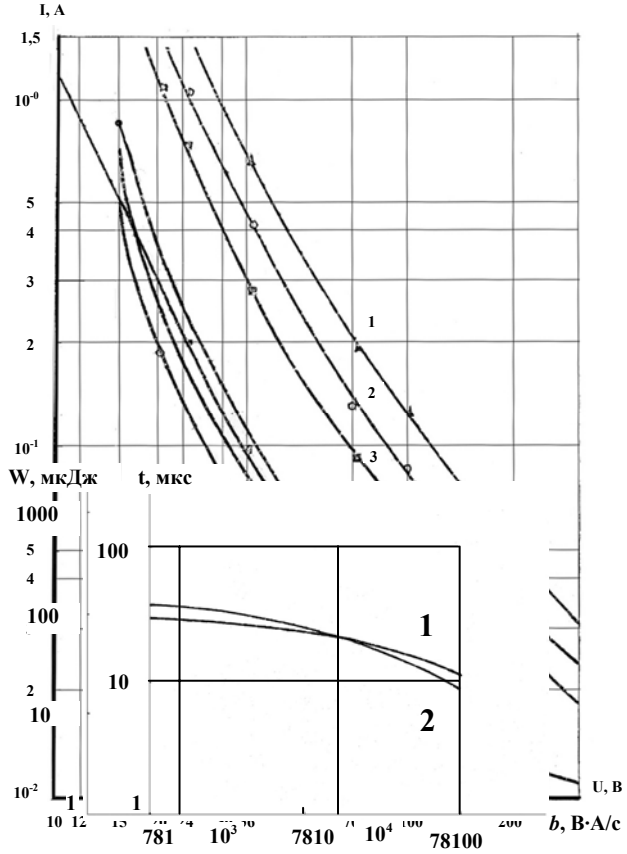


Рис. 5. Зависимость тока от напряжения при равных значениях энергии разряда: *1* – 280 мкДж; *2* – 160 мкДж (характеристика искробезопасности для метановоздушной газовой смеси); *3* – 100 мкДж; *4* – 20 мкДж; *5* – характеристика искробезопасности для водородовоздушной газовой смеси [2, 3]; *6* – 15 мкДж; *7* – 10 мкДж

Проведенные аналитические исследования позволяют оценивать влияние параметров безреактивной цепи (тока и напряжения), скорости движения контактов, а также коэффициентов, определяющих виды ионизационных процессов, на длительность разряда и величину выделяемой в разряде энергии, т.е. на те факторы, которые определяют искробезопасность цепи.

Экспериментальные исследования влияния параметров электрической цепи на длительность разряда, а, следовательно, и выделяемую в нем энергию, проведенные на искрообразующем механизме подтверждают, что напряжение оказывает большее влияние на длительность разряда, чем ток. При увеличении тока в четыре раза (от 0,25 А до 1 А) длительность разряда при напряжениях 12 В, 24 В и 36 В соответственно увеличивается в 2,4; 3,8 и 5,5 раза, а при трехкратном увеличении напряжения (от 12 В до 36 В) при токах 0,25 А; 0,5 А и 1,0 А длительность разряда увеличивается соответственно в 5; 7,1 и 8,2 раза, что согласуется с теоретическими исследованиями.

В настоящее время при проведении сертификационных испытаний на искробезопасность применяется искрообразующий механизм, рекомендованный МЭК [2, 3]. Этот механизм характеризуется значительным разбросом скоростей.

Экспериментальные исследования длительностей электрических разрядов, возникающих при коммутации цепи искрообразующим механизмом, рекомендованным МЭК, производились путем осциллографирования напряжения на разрядном промежутке. Осциллографирование проводилось осциллографом С8-13. В качестве источника постоянного напряжения использовался источник ВСП-50. Длительность развертки сигнала во времени при коммутации безреактивной цепи с напряжением 30 В и током 2 А задавалась последовательно 10, 20, 50 и 100 мкс. Это было вызвано тем,

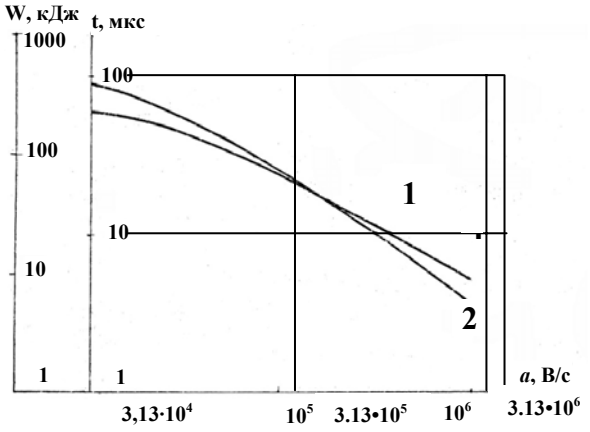


Рис. 6. Зависимость энергии и длительность разряда от коэффициента a при E = 24 В, I = 0,5 А и в = 7810 В·А/с: *1* – энергия, *2* - длительность

Рис. 7. Зависимость энергии и длительности разряда от коэффициента b при E = 24 В, I = 0,5 А и a = 313000 В/с: *1* – энергия, *2* - длительность

что при осциллографировании наблюдались разряды более 100 мкс на развертке 10 мкс/дел, более 200 мкс на развертке 20 мкс/дел и более 500 мкс на развертке 50 мкс/дел.

Из анализа гистограмм следует, что порядка 70 % разрядов имеют длительность в интервале 80 - 200 мкс (при E = 30 В, I = 2 А). Однако существуют разряды, длительность которых превышает 200, 500 и даже 1000 мкс. Кроме того, существуют разряды (порядка 10 %), длительность которых находится в пределах от 1 до 20 мкс.

Для того чтобы оценить влияние величины коммутируемого тока на длительность разряда, проведено осциллографирование разрядов размыкания и замыкания безреактивной цепи с тем же напряжением, но током 0,5 А. В результате проведенных осциллографирований было установлено, что снижение коммутируемого тока с 2 до 0,5 А приводит к снижению длительностей разрядов. Разряды с длительностью 40 - 120 мкс составляют около 80 % от общего количества. Максимальная длительность разряда размыкания при коммутации тока 0,5 А составила 500 мкс.

Таким образом, при коммутации электрической цепи искрообразующим механизмом, рекомендованным МЭК, наблюдались разряды от единиц микросекунд до единиц миллисекунд.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Озерной М.И.* Электрооборудование и электроснабжение подземных разработок угольных шахт. – М., Недра 1974.

2. МЭК 60079-11:1999 Электрооборудование для взрывоопасных газовых сред. Часть 11: Искробезопасная электрическая цепь i.

3. ГОСТ Р 51330.10 (МЭК 60079-11-99) Электрооборудование взрывозащищенное. Часть11. Искробезопасная электрическая цепь i.

Коротко об авторах

Залогин А.С. – кандидат технических наук, исполнительный директор Некоммерческой автономной организации «Центр по сертификации взрывозащищенного и рудничного электрооборудования (ЦСВЭ)»,

ТЕКУЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ О ЗАЩИТАХ ДИССЕРТАЦИЙ ПО ГОРНОМУ ДЕЛУ И СМЕЖНЫМ ВОПРОСАМ

Автор	*Название работы*	*Специальность*	*Ученая степень*
ИНСТИТУТ ГОРНОГО ДЕЛА СО РАН			
КУБАНЫЧБЕК уулу Бакыт	Обоснование параметров устройства регулируемого выпуска угля в механизированной крепи для выемки мощных пластов	05.05.06	к.т.н.
СМИРНОВ Сергей Михайлович	Обоснование параметров взрывной отбойки естественно нарушенных горных пород на рудных месторождениях Алтае-Саянского региона	25.00.22	к.т.н.
ЧИГИШЕВ Александр Николаевич	Управление воздухораспределением в метрополитенах мелкого заложения	25.00.20	к.т.н.
ЯВРОВИЧ Людмила Васильевна	Взаимосвязь параметров электромагнитных сигналов с изменением напряженно-деформированного состояния горных пород	25.00.20	к.т.н.