

УДК 621.314.6

**В. П. КОЛОСЮК, д-р техн. наук., проф., гл. науч. сотрудник, МакНИИ,
г. Макеевка**

**АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ИСКРОБЕЗОПАСНОСТИ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ РУДНИЧНОГО
ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ПО СТАНДАРТИЗИРОВАННЫМ
ХАРАКТЕРИСТИКАМ МЕЖДУНАРОДНОЙ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ КОМИССИИ**

Изложена методология оценки искробезопасности электрических цепей по характеристикам без проведения лабораторных камерных испытаний.

Ключевые слова: электрическая цепь, характеристики искробезопасности, воспламеняющий ток, индуктивность, активное сопротивление, коэффициент искробезопасности, эталонная цепь.

В настоящее время оценка искробезопасности электрических цепей рудничного взрывозащищенного электрооборудования, как правило, производится путем испытания на искробезопасность в аккредитованных специализированных лабораториях, имеющих соответствующее испытательное оборудование и высокую компетентность испытательного персонала.

В соответствии с п. 2.8 ГОСТ 22782.5 [1] испытания электрических цепей на искробезопасность необходимо производить с помощью искроборазующего механизма, помещенного во взрывную камеру, заполненную взрывчатой контрольной смесью горючих газов или паров.

Процедура испытаний требует значительного времени, ее стоимость может составлять более 5% цены испытываемых изделий. Кроме того, специалисты и организации – разработчики взрывозащищенного электрооборудования сталкиваются с необходимостью при создании электрооборудования принимать схемотехнические решения, которые должны обеспечивать принципы искробезопасности, еще до изготовления образцов и, следовательно, без результатов испытаний на искробезопасность.

Поэтому методы бескамерной оценки искробезопасности всегда были актуальными, что определяет и актуальность настоящей работы, посвященной оценке искробезопасности по электрическим характеристикам цепей.

Целью настоящей работы является обоснование методологии бескамерной оценки искробезопасности цепей с использованием технических параметров искробезопасного электрооборудования и стандартизированных характеристик искробезопасности.

Согласно п. 2.8.19 ГОСТ 22782.5 допускается производить оценку искробезопасности цепей по характеристикам искробезопасности, приведенным в справочном приложении к этому ГОСТ, без испытаний во взрывной камере. Характеристики искробезопасности представлены графиками зависимостей минимального воспламеняющего тока (или напряжения) от параметров цепи: напряжения, индуктивности, емкости и др.

Однако процедуры оценки искробезопасности в ГОСТ 22782.5 не раскрыты. Кроме того, использование приведенных в ГОСТ 22782.5 характеристик не обеспечивает достаточной точности результатов и сопряжено с недостаточной их достоверностью, что вынуждает, кроме оценки по характеристикам, как правило, дополнительно проводить испытания в камере с помощью искрообразующего механизма.

Более точные характеристики искробезопасности приведены в стандарте международной электротехнической комиссии (МЭК 60079-11) в виде графиков и таблиц [2].

В этом стандарте (МЭК) в виде обязательного приложения А регламентированы общие принципы и детализированы процедуры проверки и испытаний на искробезопасность электрооборудования с видом взрывозащиты «Искробезопасная электрическая цепь».

В указанном стандарте МЭК отмечается, что электрическую цепь можно не подвергать типовому испытанию с применением искрообразующего механизма, если ее структура и электрические параметры достаточно хорошо определены, а искробезопасность можно оценить по характеристикам искробезопасности или по таблицам, приведенным в Приложении А МЭК 60079-11. Акцентируется, что при применении искрообразующего устройства и камеры необходимо отслеживать и принимать меры по обеспечению стабильности их работы. Из-за нестабильности чувствительность искрообразующего устройства меняется, тогда, как стандартные характеристики искробезопасности и таблицы составлены на основании большого числа таких испытаний. Вследствие этого считается, что оценка с применением характеристик искробезопасности и таблиц более логична и имеет преимущество по сравнению с разовыми экспериментальными результатами, полученными с помощью искрообразующего механизма.

Рассмотрим общие принципы оценки искробезопасности цепей применительно к рудничному взрывозащищенному электрооборудованию и

взрывоопасной смеси группы I – метан на подземных горных работах температурного класса T1 с температурой самовоспламенения свыше 450⁰С.

В изложении стандарта МЭК 60079-11 искробезопасная цепь должна удовлетворять трем основным требованиям:

а) не вызывать искрового воспламенения взрывчатой смеси при испытании цепи в камере или ее оценке в соответствии с требованием искробезопасности, изложенным в стандарте;

б) не вызывать воспламенения взрывчатой смеси от теплового воздействия нагреваемых элементов искробезопасного оборудования при температуре, регламентированной для группы и температурного класса смеси;

с) искробезопасная цепь должна быть соответствующим образом отделена от других цепей посредством воздушных промежутков и путей утечки.

Требование, указанное в пункте а) может быть выполнено проведением оценки. Для этого необходимы точные данные о напряжении, токе и таких параметрах цепи, как емкость и индуктивность на границе воспламенения. При таких условиях цепь может быть оценена как искробезопасная с точки зрения искрового воспламенения по характеристикам искробезопасности, как это показано ниже.

Требование, указанное в пункте б) может быть выполнено путем оценки максимальных температур поверхности элементов по их тепловому режиму или максимальной мощности, которая может быть к ним подведена в соответствующих условиях. Максимальная температура элементов схемы не должна превышать температуру самовоспламенения смеси.

Требование, указанное в пункте с) может быть выполнено путем обеспечения соответствующих путей утечки и электрических зазоров, а также применением элементов, например трансформаторов, токоограничительных резисторов, удовлетворяющих требованиям неповреждаемых элементов. Для этого приемлемы методы экспертной оценки, позволяющие измерить величины электрических зазоров и путей утечки, регламентированных требованиями стандартов.

При оценке искрового воспламенения приоритет отдается возможности представить искробезопасную цепь в виде простой эталонной цепи. Схемы эталонных цепей и характеристики искробезопасности приведены в приложении к стандарту МЭК 60079-11, а простых индуктивной и емкостной цепей – на рис. 1.

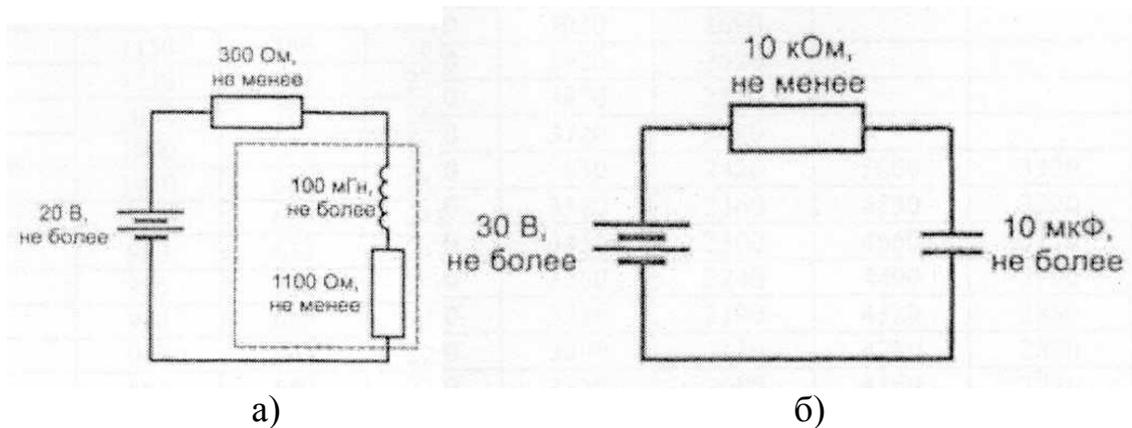


Рис. 1. Примеры эталонных цепей:

а) – простая индуктивная цепь; б) – простая емкостная цепь.

Простая эталонная омическая цепь рассматривается как комбинация источника тока с напряжением U и последовательно включенного резистора R . В эту цепь должна последовательно включаться взрывная камера с искрообразующим механизмом.

Простая эталонная индуктивная цепь группы I представлена в виде комбинации последовательно включенных источника напряжением U , резистора R и индуктивности L (рис. 1а). При этом имеется в виду, что любая индуктивность, выполненная электрическими проводами, в цепи тока имеет сопротивление R .

Простая эталонная емкостная цепь (рис. 1б) представлена комбинацией источника напряжением U , конденсатора емкостью C и резистора R .

Представление реальной искробезопасной цепи в виде простой эталонной является особо важным условием возможности оценки ее по характеристикам искробезопасности. Цепь можно считать омической, если ее индуктивность менее 10^{-4} Гн, т.е. составляет не более 0,1 мГн. В этом случае можно использовать зависимости минимальных воспламеняющих токов рис. 2. В других случаях индуктивной цепи следует использовать зависимости, приведенные на рис. 3. или в табл. 1 (приведены усеченные данные из таблицы А1 МЭК 60079-11 для напряжений 18÷22 В).

При использовании характеристик искробезопасности должны учитываться возможные повреждения элементов электрической схемы с учетом группы искробезопасности (Иа, Иб, Ис) и коэффициенты искробезопасности, чтобы оценку выполнить по наиболее опасному случаю.

Таблица 1

Допустимый ток короткого замыкания в зависимости от напряжения

Напряжение, В	Допустимый ток короткого замыкания, мА, для подгруппы (группы) электрооборудования							
	ПС		ПВ		ПА		I	
	Коэффициент искробезопасности							
	х 1	х 1,5	х 1	х 1,5	х 1	х 1,5	х 1	х 1,5
18,0	660	440	1660	1110	2240	1490	3170	2110
18,1	648	432	1630	1087	2188	1459	3083	2055
18,2	636	424	1601	1068	2139	1426	3000	2000
18,3	625	417	1573	1049	2091	1394	2935	1956
18,4	613	409	1545	1030	2045	1363	2871	1914
18,5	602	402	1518	1012	2000	1333	2807	1871
18,6	592	394	1491	995	1967	1311	2743	1828
18,7	581	387	1466	977	1935	1290	2679	1786
18,8	571	380	1441	960	1903	1269	2615	1743
18,9	561	374	1416	944	1872	1248	2551	1700
19,0	551	367	1392	928	1842	1228	2487	1658
19,1	541	361	1368	912	1812	1208	2465	1643
19,2	532	355	1345	897	1784	1189	2444	1629
19,3	523	348	1323	882	1755	1170	2423	1615
19,4	514	342	1301	867	1727	1152	2401	1600
19,5	505	337	1279	853	1700	1134	2380	1586
19,6	496	331	1258	839	1673	1116	2359	1572
19,7	448	325	1237	825	1648	1098	2337	1558
19,8	480	320	1217	811	1622	1081	2316	1544
19,9	472	314	1197	798	1597	1065	2295	1530
20,0	464	309	1177	785	1572	1048	2274	1516
20,1	456	304	1158	772	1549	1032	2219	1479
20,2	448	299	1140	760	1525	1016	2164	1443
20,3	441	294	1122	748	1502	1001	2109	1406
20,4	434	289	1104	736	1479	986	2054	1369
20,5	427	285	1087	724	1457	971	2000	1333
20,6	420	280	1069	713	1435	957	1924	1283
20,7	413	275	1053	702	1414	943	1849	1233
20,8	406	271	1036	691	1393	929	1773	1182
20,9	400	267	1020	680	1373	915	1698	1132
21,0	394	262	1004	670	1353	902	1623	1082
21,1	387	258	989	659	1333	889	1603	1069
21,2	381	254	974	649	1314	876	1583	1055
21,3	375	250	959	639	1295	863	1564	1043
21,4	369	246	945	630	1276	851	1544	1029
21,5	364	243	930	620	1258	839	1525	1017
21,6	358	239	916	611	1240	827	1505	1003
21,7	353	235	903	602	1222	815	1485	990,0
21,8	347	231	889	593	1205	804	1466	977,3
21,9	342	228	876	584	1189	792	1446	964,0
22,0	337	224	863	575	1172	781	1427	951,3

Повреждения могут рассматриваться как обрыв цепи, например, обрыв (размыкание) искрозащитного шунтирующего элемента, когда прекращается его защитное действие, или замыкание, например, токоограничивающего резистора, когда ток в цепи увеличивается. В каждом из повреждений оценка должна подтвердить, что в искробезопасной цепи ток не превышает минимального воспламеняющего (I_B), т.е. тока, при котором вероятность воспламенения взрывчатой смеси составляет 10^{-3} . Поскольку коэффициент искробезопасности (K) – это отношение минимального воспламеняющего тока (I_B) к искробезопасному току ($I_{И}$), то с помощью этого коэффициента осуществляется определение искробезопасного тока ($I_{И}$) цепи как частное $I_{И} = I_B/K$.

В изложении МЭК 60079-11 при оценке искробезопасности простых электрических цепей обычно должны применяться следующие процедуры:

- на основании анализа электрической схемы определяют самую неблагоприятную практическую ситуацию с учетом допусков для элементов, колебаний напряжения питания, повреждений изоляции и элемента;
- затем, исходя из требуемого коэффициента искробезопасности, зависящего от типа цепи, а также от уровня цепи электрооборудования, получают измененную цепь, которую можно оценивать;
- проверяют приемлемость параметров полученной цепи сравнением с характеристиками искробезопасности, указанными на рисунках или в таблицах.

Необходимо провести две отдельные оценки:

1. Оценка искробезопасности источника питания;
2. Оценка искробезопасности при подключении к источнику цепи нагрузки.

1. Методическая последовательность оценки искробезопасности источника питания

1.1. Определяют значение токоограничительного резистора R (рис. 2, 3) по наиболее неблагоприятному случаю при коротком замыкании.

1.2. Оценивают неповреждаемость токоограничительного резистора. Согласно требованиям стандартов к неповреждаемому относятся резисторы типов:

- а) пленочного;
- б) проволочного с защитой против разматывания проволоки в случае ее обрыва;
- в) печатного, используемого в гибридных и подобных цепях с покрытиями, обеспечивающими герметизацию и допустимые пути утечки.

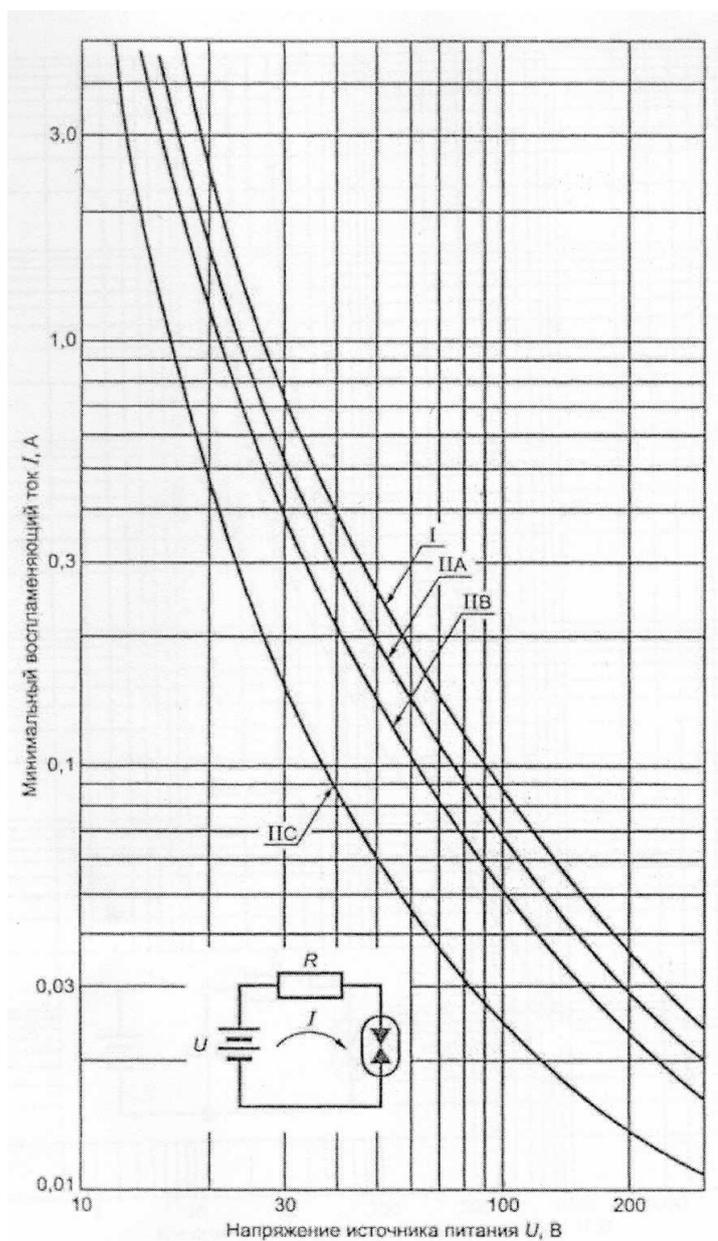


Рис. 2. Минимальный воспламеняющий ток для омической цепи (в приложении А стандарта МЭК рис. А 1):

I – категория взрывоопасной смеси – метан на подземных горных работах;

II А, II В, II С – категории взрывоопасной смеси других взрывоопасных газов и паров (за исключением метана на подземных горных работах).

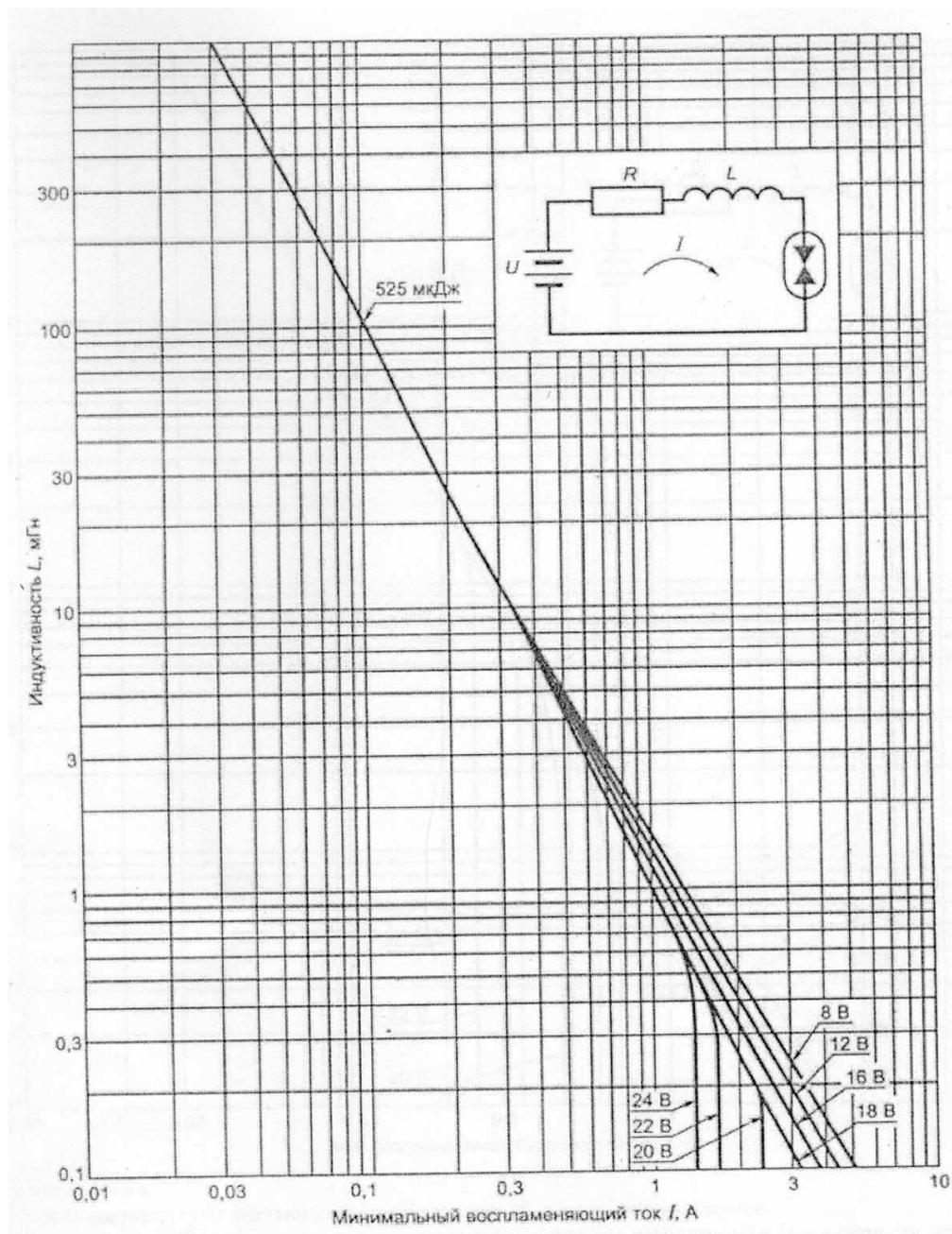


Рис. 3. Зависимости допустимой индуктивности цепи от минимального воспламеняющего тока при напряжениях цепи 8÷24 В (в Приложении А стандарта МЭК рис. А 5)

Кривые соответствуют значениям напряжения цепи U , как показано на рисунке.

Уровень энергии 525 мкДж соответствует постоянному значению накопленной в индуктивности энергии.

Если этот резистор не отвечает требованиям в отношении неповреждаемости, применение одного повреждения для группы искробезопасности цепи Иа вызовет изменение цепи, при этом резистор будет считаться короткозамкнутым. При таком повреждении ток к.з. не будет ограничиваться и источник питания не будет искробезопасным.

1.3. Определяют максимальное значение напряжения (U_m) источника (батареи). В качестве такого напряжения должно приниматься напряжение холостого хода, регламентируемое для гальванических элементов требованиями стандарта или технических условий или достигаемое на новом одно-разовом элементе (батарее), либо на свежезаряженном перезаряжаемом элементе (батарее), как указано в п. 7.4.3 МЭК 60079-11. Если табличное значение напряжения не указано, то определение максимального напряжения производится на 10 новых, полностью заряженных образцах.

1.4. Определяют максимальный ток короткого замыкания по выражению

$$I_{к.з.} = \frac{U_m}{R}. \quad (1)$$

1.5. Поскольку в режиме к.з. цепь становится омической, определяют измененную цепь, в которой ток короткого замыкания увеличен согласно коэффициенту искробезопасности (K):

$$I'_{к.з.} = I_{к.з.} \cdot K. \quad (2)$$

1.6. Определяют минимальный воспламеняющий ток (I_B) по табл. 1 при напряжении U_m .

1.7. Сравнивают полученное значение тока I_B с током к.з. $I'_{к.з.}$.

Если $I_B > I'_{к.з.}$, делают вывод о том, что обеспечивается искробезопасность источника питания при искровом воспламенении.

2. Методическая последовательность оценки искробезопасности цепи при подключении нагрузки

а) Простая индуктивная цепь

2.1. Определяют минимальное сопротивление цепи ($R_{ц}$) как сумму сопротивлений токоограничительного резистора (R) и сопротивления нагрузки (R_H):

$$R_{ц} = R + R_H. \quad (3)$$

2.2. Оценивают возможность повреждения элементов схемы.

Если токоограничительный резистор признан неповрежденным, его повреждение не рассматривается.

Нагрузка может иметь два повреждения: 1) обрыв цепи нагрузки – приводит к размыканию цепи и к отключению тока, что не вызывает искроопасности; 2) короткое замыкание нагрузки – приводит к короткому замыканию цепи, что будет соответствовать рассмотренному случаю оценки искробезопасности источника.

1.3. Определяют ток нагрузки:

$$I_H = U_m / R_{Ц}. \quad (4)$$

2.4. Для возможности воспользоваться зависимостями воспламеняющего тока, приведенными в характеристиках искробезопасности (рис. 3, табл. 1), определяют минимальный воспламеняющий ток индуктивной нагрузки (I''_B) с учетом коэффициента искробезопасности (K):

$$I''_B = I_H \cdot K. \quad (5)$$

2.5. Определяют допустимый минимальный воспламеняющий ток (I_B) по графику рис. 3 при максимальном напряжении (U_m) и индуктивности нагрузки (L) для фактической группы электрооборудования (I, или IIА, IIВ, IIС).

2.6. Сравнивают расчетный минимальный воспламеняющий ток (I''_B) с допустимым I_B .

Если $I_B > I''_B$, делают вывод о том, что электрическая цепь является искробезопасной при искровом воспламенении.

б) Простая емкостная цепь

Оценка искробезопасности источника питания осуществляется так же, как и источника питания индуктивной нагрузки.

Оценка емкостной цепи при подключении нагрузки:

1. Определяют максимальное напряжение на конденсаторе с учетом коэффициента искробезопасности для возможности воспользоваться характеристиками искробезопасности, приведенными на рис. 4 и табл. 2 (приведены усеченные данные из табл. А 2 МЭК 60079-11 для напряжений 26÷32 В):

$$U_m = U_{xx} \cdot K. \quad (6)$$

2. Определяют минимальную воспламеняющую емкость по характеристике искробезопасности рис. 4 при напряжении U_m .

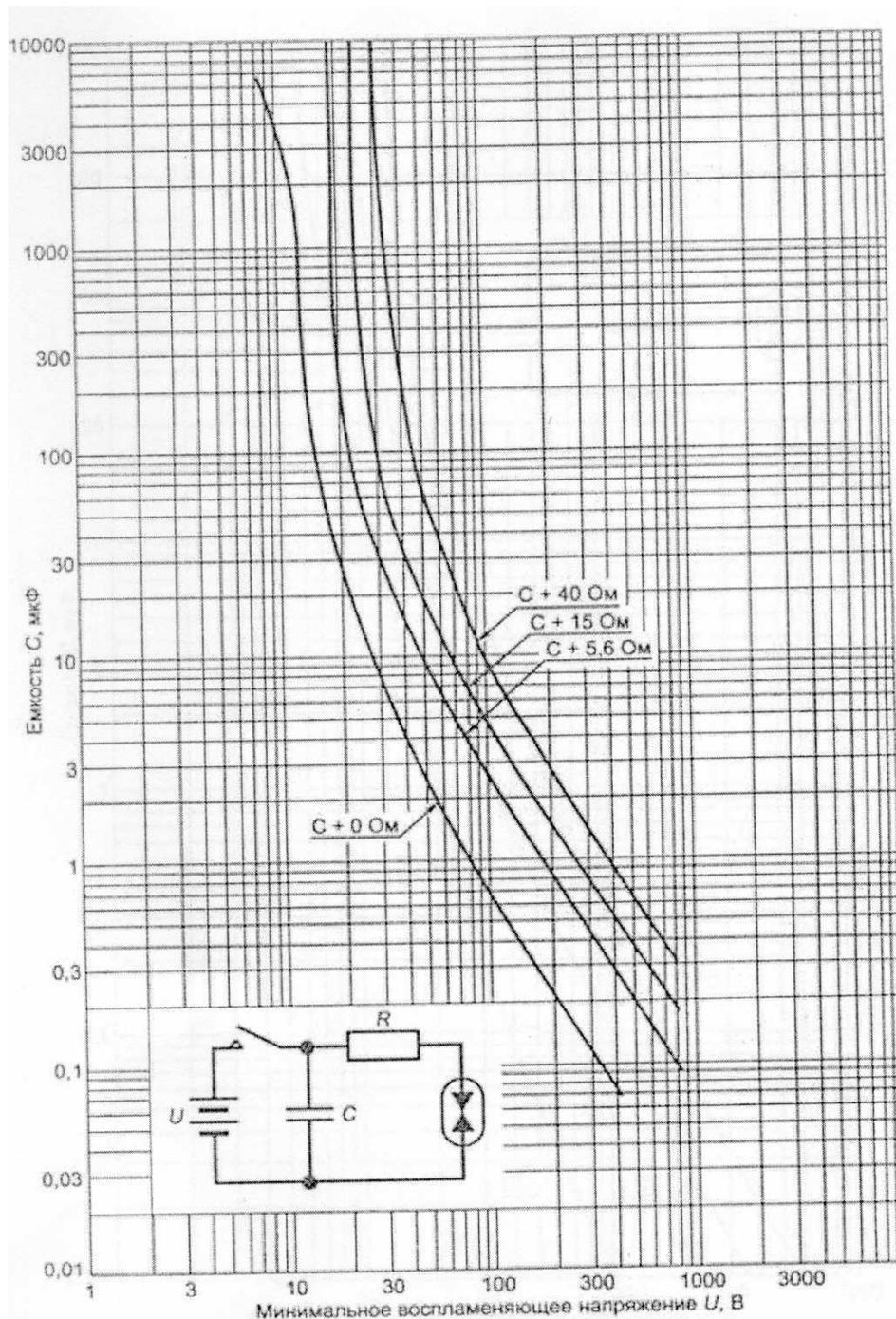


Рис. 4. Зависимость допустимой емкости цепи от минимального воспламеняющего напряжения при сопротивлениях токоограничительного резистора (в приложении А стандарта МЭК рис. А 2)

Кривые соответствуют указанным значениям токоограничительного резистора.

3. Сравнивают полученное значение минимальной воспламеняющей емкости (C_B) с фактической емкостью заданной цепи (C).

Делают вывод: если $C_B > C$ цепь является искробезопасной при искровом воспламенении; если $C_B < C$ – цепь не может быть оценена как искробезопасная.

4. Определяют условия обеспечения искробезопасности, если получено $C_B < C$ путем:

4.1. Снижения напряжения источника, если нужно сохранить величину емкости конденсатора C :

напряжение, соответствующее емкости C по рис. 4, снижают в соответствии с коэффициентом искробезопасности:

$$U/K. \quad (7)$$

4.2. Установкой последовательно с конденсатором неповреждаемого резистора, как показано на рис. 4, чтобы минимальное воспламеняющее напряжение было не менее максимального фактического напряжения цепи, т.е.

$$U'_B \geq U_m. \quad (8)$$

Таблица 2

Допустимая емкость в зависимости от напряжения и группы электрооборудования

Напряжение, В	Допустимый ток короткого замыкания, мА, для подгруппы (группы) электрооборудования							
	ПС		ПВ		ПА		I	
	Коэффициент искробезопасности							
	х 1	х 1,5	х 1	х 1,5	х 1	х 1,5	х 1	х 1,5
1	2	3	4	5	6	7	8	9
26,0	0,350	0,099	2,05	0,77	8,5	2,60	10,5	4,00
26,1	0,345	0,098	2,02	0,76	8,4	2,57	10,4	3,99
26,2	0,341	0,097	1,99	0,75	8,3	2,54	10,3	3,97
26,3	0,337	0,097	1,96	0,74	8,2	2,51	10,1	3,95
26,4	0,333	0,096	1,93	0,74	8,1	2,48	10,0	3,93
26,5	0,329	0,095	1,90	0,73	8,0	2,45	9,8	3,92
26,6	0,325	0,094	1,87	0,73	8,0	2,42	9,7	3,91
26,7	0,321	0,093	1,84	0,72	7,9	2,39	9,5	3,90
26,8	0,317	0,092	1,823	0,72	7,8	2,37	9,4	3,85
26,9	0,313	0,091	1,80	0,71	7,7	2,35	9,2	3,80
27,0	0,309	0,090	1,78	0,705	7,60	2,33	9,0	3,75
27,1	0,305	0,089	1,76	0,697	7,50	2,31	8,9	3,70
27,2	0,301	0,089	1,74	0,690	7,42	2,30	8,8	3,65

Продолжение табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9
27,3	0,297	0,088	1,72	0,683	7,31	2,28	8,7	3,60
27,4	0,293	0,087	1,71	0,677	7,21	2,26	8,6	3,55
27,5	0,289	0,086	1,70	0,672	7,10	2,24	8,6	3,55
27,6	0,285	0,086	1,69	0,668	7,00	2,22	8,5	3,50
27,7	0,281	0,085	1,68	0,663	6,90	2,20	8,5	3,45
27,8	0,278	0,084	1,67	0,659	6,80	2,18	8,4	3,45
27,9	0,275	0,084	1,66	0,654	6,70	2,16	8,4	3,45
28,0	0,272	0,083	1,65	0,650	6,60	2,15	8,3	3,40
28,1	0,269	0,082	1,63	0,645	6,54	2,13	8,2	3,40
28,2	0,266	0,081	1,62	0,641	6,48	2,11	8,2	3,35
28,3	0,263	0,08	1,60	0,636	6,42	2,09	8,1	3,35
28,4	0,26	0,079	1,59	0,632	6,36	2,07	8,1	3,30
28,5	0,257	0,078	1,58	0,627	6,30	2,05	8,0	3,30
28,6	0,255	0,077	1,57	0,623	6,24	2,03	7,9	3,25
28,7	0,253	0,077	1,56	0,618	6,18	2,01	7,8	3,25
28,8	0,251	0,076	1,55	0,614	6,12	2,00	7,8	3,20
28,9	0,249	0,075	1,54	0,609	6,06	1,98	7,7	3,20
29,0	0,247	0,074	1,53	0,605	6,00	1,97	7,6	3,15
29,1	0,244	0,074	1,51	0,600	5,95	1,95	7,6	3,15
29,2	0,241	0,073	1,49	0,596	5,90	1,94	7,5	3,10
29,3	0,238	0,072	1,48	0,591	5,85	1,92	7,4	3,10
29,4	0,235	0,071	1,47	0,587	5,80	1,91	7,4	3,10
29,5	0,232	0,071	1,46	0,582	5,75	1,89	7,3	3,05
29,6	0,229	0,07	1,45	0,578	5,70	1,88	7,4	3,05
29,7	0,226	0,069	1,44	0,573	5,65	1,86	7,3	3,05
29,8	0,224	0,068	1,43	0,569	5,60	1,85	7,3	3,00
29,9	0,222	0,067	1,42	0,564	5,55	1,83	7,2	3,00
30,0	0,220	0,066	1,41	0,560	5,50	1,82	7,2	3,00
30,2	0,215	0,065	1,39	0,551	5,40	1,79	7,0	2,95
30,4	0,210	0,064	1,37	0,542	5,30	1,76	6,9	2,90
30,6	0,206	0,0626	1,35	0,533	5,20	1,73	6,8	2,85
30,8	0,202	0,0616	1,33	0,524	5,10	1,70	6,6	2,80
31,0	0,198	0,0605	1,32	0,515	5,00	1,67	6,5	2,75
31,2	0,194	0,0596	1,30	0,506	4,90	1,65	6,4	2,70
31,4	0,190	0,0587	1,28	0,497	4,82	1,62	6,4	2,70
31,6	0,186	0,0578	1,26	0,489	4,74	1,60	6,3	2,65
31,8	0,183	0,0569	1,24	0,482	4,68	1,58	6,2	2,65
32,0	0,180	0,0560	1,23	0,475	4,60	1,56	6,2	2,60

Для более подробной иллюстрации процедуры оценки искробезопасности по характеристикам рассмотрим 2 примера.

А. Пример оценки искробезопасности простой индуктивной цепи взрывозащищенного электрооборудования группы I.

Цепь показана на рис. 1, а и состоит из источника питания в виде эле-

мента или батареи напряжением 20 В и последовательно установленного неповреждаемого токоограничительного резистора сопротивлением 300 Ом, к которому подключен индуктивный элемент сопротивлением $R_H = 1100$ Ом и индуктивностью $L = 100$ мГн, как показано на рис. 2. Значения 300 и 1100 Ом – минимальные, а 100 мГн – максимальное значение.

1. Оценка искробезопасности источника питания

1.1. Значение токоограничительного резистора устанавливают минимально 300 Ом, что соответствует наиболее неблагоприятному случаю при коротком замыкании.

Если этот резистор не отвечает требованиям в отношении неповреждаемости, применение одного повреждения для группы искробезопасности Ia вызовет изменение цепи, при этом резистор будет считаться короткозамкнутым. При таком повреждении ток к.з. не будет ограничиваться и источник питания не будет искробезопасным.

1.2. Определяют максимальное значение напряжения источника (батареи).

Для рассматриваемого случая максимальное значение напряжения батареи необходимо принять

$$U_m = 1,1 U_H,$$

где U_H – номинальное напряжение, указанное предприятием-изготовителем.

$$U_m = 1,1 \cdot 20 = 22 \text{ В.}$$

1.3. Определяют максимальный ток короткого замыкания по выражению (1)

$$I_{к.з.} = \frac{U_m}{300} = \frac{22}{300} = 0,0733 = 73,3 \text{ мА.}$$

1.4. Поскольку в режиме к.з. цепь становится омической, определяем измененную цепь, в которой ток короткого замыкания увеличен согласно коэффициенту искробезопасности $K = 1,5$ по выражению (2)

$$I'_{к.з.} = 73,3 \cdot 1,5 = 110 \text{ мА.}$$

1.5. Определяем минимальный воспламеняющий ток (I_B) по табл. 1 при напряжении $U = 22$ В для группы I:

$$I_B = 951,3 \text{ мА.}$$

1.6. Сравнивая значение полученного тока с током короткого замыкания (табл. 1), делаем вывод об искробезопасности:

так как $I_B = 951,3 \text{ мА} > I'_{к.з.} = 110 \text{ мА}$, обеспечивается искробезопасность источника питания при искровом воспламенении.

2. Оценка искробезопасности индуктивной цепи при подключении нагрузки

2.1. Определяем минимальное сопротивление цепи по выражению (3) как сумму сопротивления токоограничительного резистора $R = 300 \text{ Ом}$ и сопротивления нагрузки $R_H = 1100 \text{ Ом}$:

$$R_{ц} = R + R_H = 300 + 1100 = 1400 \text{ Ом.}$$

2.2. Определяем ток нагрузки по выражению (4)

$$I_H = \frac{U_m}{R_{ц}} = \frac{24,2}{1400} = 0,0173 \text{ А} = 17,3 \text{ мА.}$$

2.3. Оцениваем возможность повреждений элементов схемы.

Поскольку токоограничительный резистор неповреждаемый, его повреждение не рассматривается, а повреждение индуктивной нагрузки в результате короткого замыкания ведет к формированию рассмотренного случая оценки искробезопасности источника, показавшему, что сам источник питания является искробезопасным.

2.4. Для возможности воспользоваться зависимостями минимального воспламеняющего тока, приведенными в характеристиках искробезопасности (рис. 3, табл. 1), определяем минимальный воспламеняющий ток индуктивной нагрузки с учетом коэффициента искробезопасности $K = 1,5$ по выражению (5):

$$I''_B = 1,5 \cdot I_H = 1,5 \cdot 17,3 = 26 \text{ мА.}$$

2.5. Определяем допустимый минимальный воспламеняющий ток по рис. 3 при напряжении 22 В и индуктивности $L = 100 \text{ мГн}$ для группы I:

$$I''_B = 100 \text{ мА}$$

2.6. Сравнивая расчетный минимальный воспламеняющий ток I''_B с допустимым I_B , делаем вывод об искробезопасности цепи:

так как $I_B = 100 \text{ мА} > I''_B = 26 \text{ мА}$, обеспечивается искробезопасность индуктивной цепи при искровом воспламенении.

Рассмотренная оценка искробезопасности индуктивной цепи относится к ее индуктивному элементу с воздушным сердечником (или без сердечника). Если индуктивный элемент имеет железный сердечник, то такую оценку можно рассматривать только как приблизительную или предварительную и потребуются проводить испытания цепи с применением искробразующего механизма во взрывной камере, заполненной взрывчатой смесью. Для рудничного электрооборудования состав взрывоопасной метановоздушной смеси должен содержать $8,3 \pm 0,3$ процента метана в воздухе или активированной водородо-воздушной смеси с содержанием водорода 47% и 53% воздуха согласно ГОСТ 22782.5 или 52% водорода и 48% воздуха согласно МЭК 60079-11.

Поэтому импортируемое в Украину зарубежное взрывозащищенное электрооборудование, прошедшее испытание по требованиям искробезопасности согласно стандарту МЭК 60079-11, может потребовать дополнительных испытаний с применением активированной взрывоопасной смеси согласно ГОСТ 22782.5, поскольку воспламеняющая способность 47% водородо-воздушной смеси по ГОСТ 22782.5 не адекватна воспламеняющей способности 52% водородо-воздушной смеси по МЭК 60079-11.

Подчеркнем, что во всех случаях более целесообразно использовать табличное представление характеристик искробезопасности – зависимостями минимальных воспламеняющих токов от величины напряжения источника (табл. 1) или допустимой емкости от напряжения для рассматриваемой группы электрооборудования (табл. 2).

Заметим, что характеристики искробезопасности (рис. 1, 2, 3 и табл. 1, 2) позволяют оценивать искробезопасность только простых (эталонных) цепей применительно к представительным активизированным смесям. Во многих случаях их может быть трудно применить для оценки искробезопасных цепей, встречающихся на практике. Например, многие источники питания имеют нелинейные характеристики и не могут быть оценены по характеристикам искробезопасности, т.к. рис. 2 может быть использован только в случае, когда цепь представлена батареей с последовательно подключенным токоограничивающим резистором. Нелинейные цепи могут вызвать воспламенение при более низких значениях тока, чем те, которые можно прогнозировать по рис. 2 в зависимости от напряжения холостого хода источника и тока короткого замыкания. Необходимо тщательно убедиться в том, что оценки выполняются только для случаев, когда рассматриваемая цепь может быть представлена одной из простых цепей, для которых имеется информация о ее параметрах.

В ряде случаев сложные электрические цепи в отношении своих искробезопасных свойств могут быть с учетом некоторых допущений, не

снижающих их искробезопасность, сведены к простым электрическим цепям, допускающим проведение оценки искробезопасности по характеристикам, например, нелинейную характеристику можно заменить на характеристику с прямолинейными участками аппроксимации, выбрав наиболее подходящий линейный участок для оценки искробезопасности по характеристикам.

Б. Пример оценки искробезопасности электрической емкостной цепи взрывозащищенного электрооборудования группы I

Цепь показана на рис. 1, б и состоит из последовательно соединенных батареи номинальным напряжением $U = 30\text{В}$, неповреждаемого токоограничительного резистора сопротивлением 10 кОм и конденсатора емкостью 10 мкФ . В этом примере значения 30В и 10 мкФ – максимальные, а 10 кОм – минимальное значение.

1. Оценка искробезопасности источника

1.1. Токоограничительный резистор неповреждаемый, максимальное напряжение источника 30В , поэтому ток короткого замыкания будет:

$$I_{\text{к.з.}} = \frac{30}{10000} = 0,003\text{ А} = 3\text{ мА}.$$

1.2. Определяем ток к.з. с учетом коэффициента искробезопасности $K = 1,5$

$$I'_{\text{к.з.}} = 3 \cdot 1,5 = 4,5\text{ мА}.$$

1.3. Определяем допустимый минимальный воспламеняющий ток ($I_{\text{В}}$) цепи, как омический по рис. 2 или табл. 1 при максимальном напряжении цепи $U_{\text{м}} = 30\text{ В}$.

1.4. Сравниваем значение допустимого минимального воспламеняющего тока ($I_{\text{В}} = 730\text{ мА}$) с максимальным фактическим током к.з. ($I'_{\text{к.з.}} = 4,5\text{ мА}$). Поскольку соблюдается условие $I_{\text{В}} = 730\text{ мА} > I'_{\text{к.з.}} = 4,5\text{ мА}$, делаем вывод об обеспечении искробезопасности источника при искровом воспламенении с большим коэффициентом запаса – свыше 100.

2. Оценка искробезопасности емкостной цепи при подключении нагрузки

2.1. Определяем исходные данные и оцениваем повреждаемость элементов схемы: максимальное напряжение батареи $U_{\text{м}} = 30\text{ В}$, максимальная емкость конденсатора $C = 10\text{ мкФ}$; минимальное сопротивление токоограничительного резистора $R = 10\text{ кОм}$. Никакие повреждения в элементах схемы не рассматриваются, т.к. резистор неповреждаемый, а неисправность конденсатора вследствие к.з. или обрыва цепи приводит к формиро-

ванию резистивной цепи, что рассмотрено при оценке искробезопасности источника.

2.2. Определяем максимальное напряжение с учетом коэффициента искробезопасности $K = 1,5$ для возможности применения характеристик искробезопасности (рис. 4, табл. 2)

$$U'_m = U_m \cdot 1,5 = 30 \cdot 1,5 = 45 \text{ В.}$$

2.3. Определяем по характеристике искробезопасности рис. 4 минимальную воспламеняющую емкость по кривой $C = 0$ при $U'_m = 45 \text{ В}$.

Имеем $C_B = 3 \text{ мкФ}$.

2.4. Сравниваем величину допустимой минимальной воспламеняющей емкости $C_B = 3 \text{ мкФ}$ с фактической емкостью цепи $C = 10 \text{ мкФ}$ и приходим к выводу, что цепь не может быть оценена как искробезопасная, т.к. $C_B = 3 \text{ мкФ} < C = 10 \text{ мкФ}$.

2.5. Определяем возможность альтернативного обеспечения искробезопасности путем: снижения напряжения источника, уменьшения емкости конденсатора или установкой последовательно с конденсатором неповреждаемого резистора.

Если емкость уменьшать нецелесообразно, то при емкости 10 мкФ согласно рис. 4 минимальное напряжение воспламенения равно 26 В , поэтому напряжение источника должно быть снижено в соответствии с коэффициентом искробезопасности до величины $U_m = 26/1,5 = 17,3 \text{ В}$. Емкость 10 мкФ также можно оставить, если последовательно с конденсатором установить токоограничительный резистор сопротивлением $5,6 \text{ Ом}$, что дает согласно рис. 4 минимальное напряжение воспламенения 48 В .

Во всех этих вариантах обеспечивается искробезопасность рассматриваемой емкостной цепи при искровом воспламенении.

Следует иметь в виду, что значение минимального напряжения воспламенения для емкостных цепей на рис. 4 применяют к заряженному конденсатору, который будто бы не присоединен непосредственно к источнику питания, и имеет высокий коэффициент искробезопасности (больше 100). Однако, если источник питания будет иметь минимальный коэффициент искробезопасности, то его подключение к конденсатору может привести к ситуации, когда цепь будет искроопасной, несмотря на то, что оценка по характеристикам искробезопасности, приведенным на рис. 4, показывает искробезопасность цепи. Поэтому оценку искробезопасности таких цепей необходимо проводить с применением искрообразующего механизма.

ВЫВОДЫ

1. Обоснованная по требованиям стандарта МЭК методология оценки искробезопасности электрических цепей рекомендуется к использованию заинтересованными организациями и лицами для экспертного или прогнозного определения искробезопасности рудничного взрывозащищенного электрооборудования без проведения испытаний во взрывной камере на искробразующем механизме.

2. Необходимым условием такой оценки является возможность представления структуры электрической цепи в виде эталонной с достоверно определенными электрическими параметрами и линейной вольтамперной характеристикой ее реактивных элементов для обеспечения использования стандартных характеристик искробезопасности.

3. Оценка искробезопасности по характеристикам не заменяет испытаний цепей с помощью искробразующего механизма во взрывной камере, а является простым и доступным инженерным методом обоснования принятия решений по обеспечению искробезопасности при создании или экспертизе взрывозащищенного электрооборудования, она снижает сроки и затраты на выполнение работ, тогда как камерные испытания на искробезопасность обеспечивают подтверждение результатов оценки искробезопасности, проверенной по характеристикам, и удостоверяет соответствие требованиям маркировки уровня и вида взрывозащиты электрооборудования при его сертификации и допуске к применению в шахтах, опасных по газу, или других потенциально взрывоопасных условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Электрооборудование взрывозащищенное с видом взрывозащиты «Искробезопасная электрическая цепь». Технические требования и методы испытания: ГОСТ 22782.5-1985. – [Введен 1980-01.-01]. – М.: Изд.-во стандартов, 1985. – 70 с.
2. Explosive atmospheres – Part 11: Equipment protection by intrinsic safety «I» – Международный стандарт. Взрывоопасная атмосфера – часть 11: оборудование защищенное посредством искробезопасной цепи «i»): IEC 60079-11 INTERNATIONAL STANDARD. – МЭК 60079-11. – International Electrotechnical Commission, Geneva. Swizerland, 2006. – 233 p.
3. Система стандартов безопасности труда. Смеси взрывоопасные. Классификация и методы испытаний: ГОСТ 12.1.1.011-1985. – [Введен 1979.07.01]. – М.: Изд.-во стандартов, 1985. – 18 с.

Получено: 16.05.2013

Викладено методологію оцінки іскробезпеки електричних кіл за характеристиками без проведення лабораторних камерних випробувань.

Ключові слова: електричне коло, характеристики іскробезпеки, запалювальний струм, індуктивність, активний опір, коефіцієнт іскробезпеки, еталонне коло.

The methodology of an assessment of an electric chains intrinsic safety according to characteristics without carrying out laboratory chamber researches is stated.

Key-words: electric circuit, intrinsic safety characteristics, ignition current, inductance, resistance, intrinsic safety coefficient, reference circuit.