

УДК621.3:622

**А. Г. МНУХИН, д-р техн. наук, зам. директора,
А. М. БРЮХАНОВ, д-р техн. наук, директор,
И. П. ГОРОШКО, зав. лаб., МакНИИ, г. Макеевка
В. В. КОРОТКОВ канд. техн. наук, генеральный конструктор ПАО
СКБ РТУ, г. Донецк
И. В. ИОРДАНОВ, пред. правления, генеральный директор ООО
«ТЭТЗ-ИНВЕСТ», г. Киев
В. А. МНУХИН, канд. техн. наук, директор ООО «Электрогидравлика», г. Макеевка**

УСТРОЙСТВО СВЕРХБЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕЙ ЗАЩИТЫ

Описаны принципы и конструктивные особенности сверхбыстродействующей максимальной токовой защиты нового поколения.

Защита предназначена для современного применения со сверхбыстродействующей коммутационной аппаратурой, а также с выключателями традиционных типов (воздушными, вакуумными и т.п.).

Ключевые слова: устройство защиты, быстродействие, аппарат коммутационный, ток короткого замыкания, кабель, фаза коммутации.

При создании аппаратов защиты, предназначенных для работы во взрывоопасных средах [1, 2], одним из важнейших параметров является их быстродействие, т.е. время отключения аварийного элемента или участка сети. Это время складывается из времени работы непосредственно самого коммутационного аппарата и времени устройства измерения, т.е. самой защиты, которая также должна обладать высоким быстродействием.

Цель работы: создание устройства сверхбыстродействующей токовой защиты для элементов систем электроснабжения взрывоопасных производств [3].

Создаваемое устройство базируется на свойстве протяженного силового кабеля нести информацию, обеспечивающую возможность реализации сверхбыстродействующей защиты от токов короткого замыкания (к.з.), посредством установки на прямом и обратном проводах кабеля в любой точке электрической сети взрывоопасного производства, в частности шахте, бесконтактных датчиков съема информации об энергетическом спектре переходного процесса, возникающего в момент к.з. в защищаемой сети.

Эквивалентная схема такой электрической сети показана на рис. 1.

До момента возникновения к.з. в электрической сети наблюдается стационарный (установившийся) процесс, который характеризуется рабочими напряжением U_R , током I_R и частотой f_R . В момент возникновения к.з. в электрической сети начинается переходной процесс, резко возрастает ток, падает напряжение и возникает спадающий с ростом частоты непрерывный амплитудный (энергетический) спектр. Процесс в этом случае не периодический.

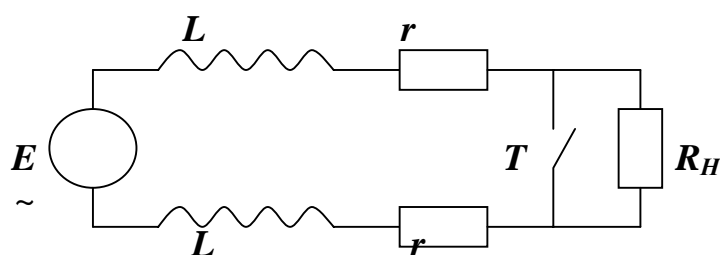


Рис. 1. Эквивалентная схема электрической сети:

E – источник питания; R_H – сопротивление нагрузки;
 T – выключатель, имитирующий режим к. з.; L – индуктивность проводов кабеля; r – активное сопротивление проводов кабеля

Амплитудный (энергетический) спектр появляется в момент начала переходного процесса, вызванного к.з. Поэтому устройства защиты от токов к.з., построенные на основе датчиков, реагирующих на появление энергетического спектра, позволяют свести время реакции до предельного минимума. При этом представляется несущественным, какое напряжение в электрической сети – переменное или постоянное.

Время реакции датчика t_d является одним из слагаемых общего времени реакции устройства защиты от токов к.з. Вторым слагаемым является время реакции t_u исполнительного устройства отключения источника питания.

Как правило, в качестве источника питания используется трехфазная промышленная сеть $380 \pm 38\text{В}$ 50 Гц достаточно большой мощности, поэтому, даже при наличии питающей передвижной подстанции, в расчетах допустимо не учитывать внутреннее сопротивление источника питания.

В этом случае длительность переходного процесса Δt в электрической сети может быть охарактеризована постоянной времени τ , которая определяется индуктивностью L и сопротивлением потерь r проводов кабеля питания.

Нормированная, т.е. приведенная к длине постоянная времени есть величина фиксированная (постоянная) для каждого конкретного типа кабеля. Для взрывоопасного производства целесообразно применять в элек-

трических сетях кабели с минимальным значением постоянной времени.

В соответствии с [4], следующие величины определяются из выражений:

$$\tau = \frac{L}{r}; \quad (1)$$

длительность переходного процесса:

$$\Delta t = 3.84 \cdot \tau; \quad (2)$$

сопротивление потерь одиночного провода:

$$r = \frac{l}{\sigma \cdot s}, \quad (3)$$

где l – длина одиночного провода;

$\sigma = 5,6 \cdot 10^7 \text{ 1/ом} \cdot \text{м}$ – удельная проводимость медного провода;

s – площадь поперечного сечения провода.

В соответствии с [5] индуктивность двух параллельных проводов, прямого и обратного, определяется из выражения:

$$L = \frac{\mu}{\pi} \cdot (l \cdot \ln \frac{2 \cdot h}{d} - h), \quad (4)$$

где h – расстояние между осями проводов;

d – диаметр провода;

$\mu = 4 \cdot \pi \cdot 10^7 \text{ Гн/м}$ – магнитная постоянная.

Для примера произведем расчеты по приведенным выражениям для силового кабеля, используемого для горных разработок и землеройных работ, в частности, для кабеля марки КГЭШ, используемого в угольных шахтах для питания передвижных машин и механизмов на переменное напряжение 1140В, 50Гц и ток до 200А [6] $R_H \geq 5,7 \text{ Ом}$.

Конструктивные характеристики кабеля, необходимые для расчетов: $d = 9,44 \text{ мм}$; $h = 13,84 \text{ мм}$; $s = 70 \text{ мм}^2$.

Результаты расчетов для постоянной времени и длительности переходного процесса представлены на графиках рисунков 2 и 3.

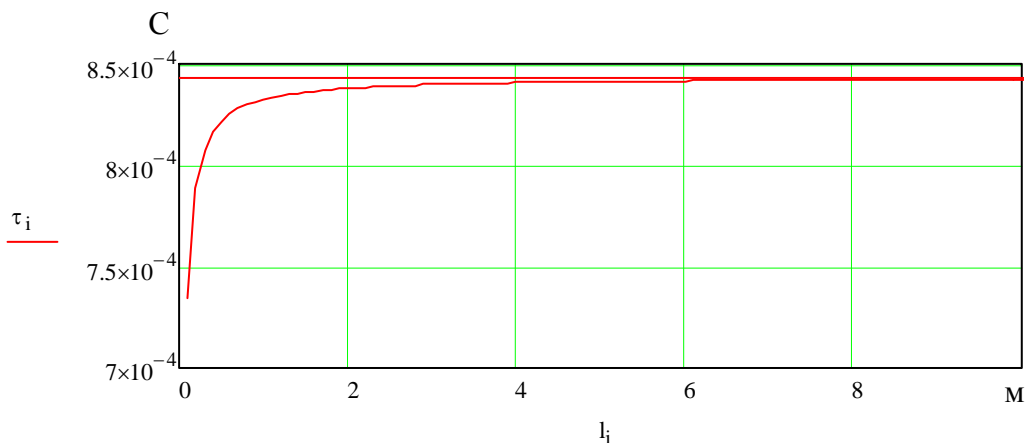


Рис. 2. Зависимость постоянной времени от длины кабеля

Из рисунков видно, что при увеличении длины кабеля более 5-10 метров как постоянная времени, так и длительность переходного процесса уже практически не изменяются.

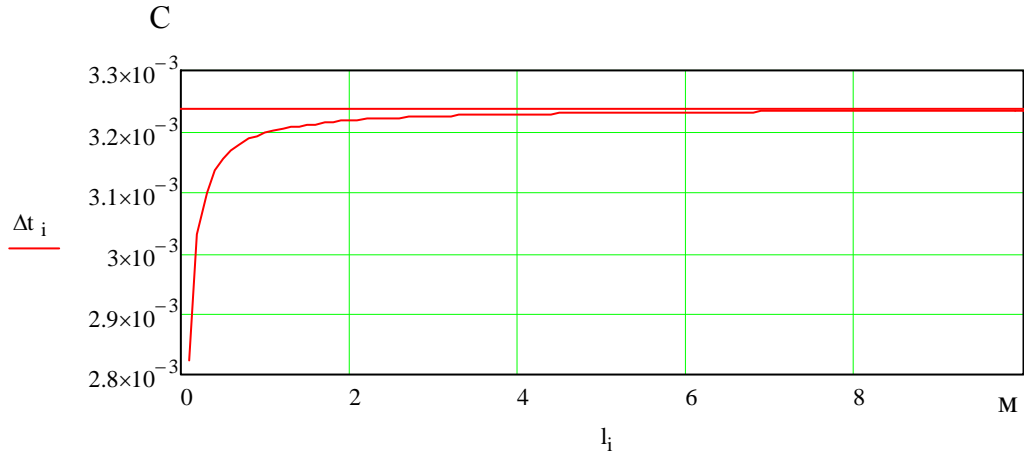


Рис. 3. Зависимость длительности переходного процесса от длины кабеля

Для выбранного типа кабеля КГЭШ $\tau = 0,000843$ сек.; $\Delta t = 0,00324$ сек.

Это обусловлено характером зависимости индуктивности и сопротивления потерь жил кабеля от их длины для данного типа кабеля. Для другого типа кабеля этого может и не быть, почему необходимо выполнять расчеты под каждый кабель конкретно. Но все это не является принципиальным с точки зрения реализации быстродействующей защиты от токов к.з.

Поведение тока в схеме, приведенной на рис. 1, описывается дифференциальным уравнением первого порядка

$$\frac{di}{dt} + \frac{R}{L} \cdot i = \frac{1}{L} \cdot E(t), \quad (5)$$

где $E(t)$ – напряжение на входе цепи определяется:

$$E(t) = U \cos(\omega \cdot t + \psi), \quad (6)$$

где U – амплитуда напряжения;

$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ – круговая частота;

$f = 50$ Гц – частота промышленной сети;

ψ – начальная фаза коммутации.

Общее решение уравнения можно представить в виде

$$i = i_{CB} + i_B, \quad (7)$$

где i_{CB} – свободный ток в цепи;

i_B – ток вынужденного режима;

$$i_{CB} = A \cdot e^{-\frac{R}{L} \cdot t} = A \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (8)$$

где A – постоянная интегрирования.

$$i_B = I \cos(\omega \cdot t + \psi - \varphi), \quad (9)$$

где $I = U/z$ – амплитуда тока.

$$\varphi = \arctg(\omega L/R) = \arctg(\omega \tau). \quad (10)$$

$$z = \sqrt{R^2 + \omega^2 \cdot L^2}. \quad (11)$$

В момент времени $t = (-0)$:

$$R_- = R_H + 2r \quad (12)$$

$$\varphi_- = \arctg(\omega L/R_-) = \arctg(\omega \tau_-). \quad (13)$$

В момент времени $t = (+0)$:

$$R_+ = 2r \quad (14)$$

$$\varphi_+ = \arctg(\omega L/R_+) = \arctg(\omega \tau_+).$$

До момента возникновения к.з. в электрической сети был установившийся (вынужденный) режим и в цепи проходил ток

$$i_- = i_{B-} = I_- \cos(\omega \cdot t + \psi - \varphi_-). \quad (15)$$

После возникновения к.з. возникает переходной процесс, и ток стремится к новому установившемуся (вынужденному) режиму, в соответствии с выражением

$$i_+ = A \cdot e^{-\frac{t}{\tau_+}} + I_+ \cdot \cos(\omega \cdot t + \psi - \varphi_+). \quad (16)$$

В индуктивности, в момент времени возникновения к.з. ($t = 0$), ток не может измениться мгновенно, поэтому, можно записать для $t = 0$, $i_+ = i_-$, откуда

$$A = I_- \cdot \cos(\psi - \varphi_-) - I_+ \cdot \cos(\psi - \varphi_+). \quad (17)$$

Окончательно выражение для переходного процесса в электрической цепи с момента возникновения к.з. $t \geq 0$ можно записать в виде

$$i(t \geq 0) = (I_- \cdot \cos(\psi - \varphi_-) - I_+ \cdot \cos(\psi - \varphi_+)) \cdot e^{-\frac{t}{\tau_+}} + I_+ \cdot \cos(\omega \cdot t + \psi - \varphi_+). \quad (18)$$

Расчеты проведем для следующих характеристик электрической сети:

$$\begin{aligned} U &= 1140 \text{ В}; & R_H &= 10 \text{ Ом}; & l &= 100 \text{ м}; & f &= 50 \text{ Гц}; \\ \psi &= 0, \pi/4, \pi/2, 3\pi/4, \pi; & 2r &= 0,0510204082 \text{ Ом}; \\ L &= 4,302463 \cdot 10^{-5} \text{ Гн}; & \tau &= 0,0008432827 \text{ сек.} \end{aligned}$$

Результаты расчетов по выражению (18) представлены на графике рис. 4.

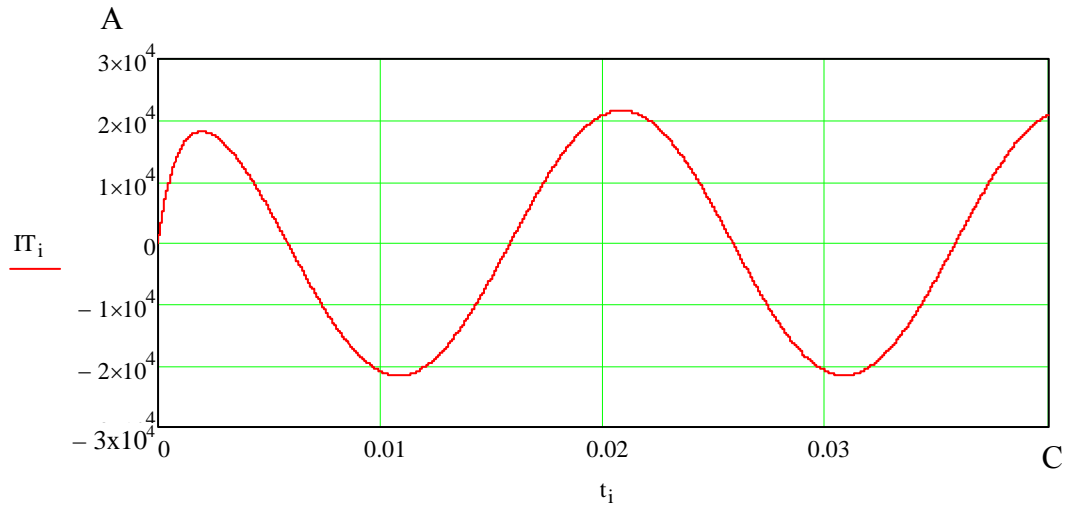


Рис.4. Процесс изменения тока в цепи с момента возникновения к.з.

На рис. 5 показана составляющая свободного тока, возникающая в момент появления к.з., которая собственно и обуславливает появление спектра переходного процесса:

$$i_{CB}(t \geq 0) = (I_- \cdot \cos(\psi - \varphi_-) - I_+ \cdot \cos(\psi - \varphi_+)) \cdot e^{-\frac{t}{\tau_+}}. \quad (19)$$

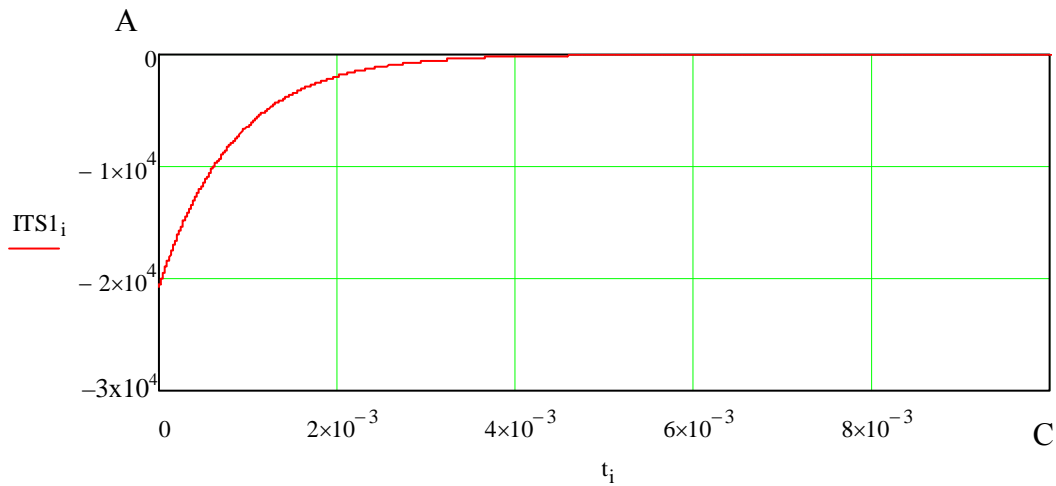


Рис. 5. Составляющая свободного тока

Модуль спектральной плотности переходного процесса определяется из выражения

$$F(f) = \frac{I_- \cdot \cos(\psi - \varphi_-) - I_+ \cdot \cos(\psi - \varphi_+)}{\sqrt{\left(\frac{1}{\tau_+}\right)^2 + (2 \cdot \pi \cdot f)^2}} \quad (20)$$

На рис. 6 показан график модуля спектральной плотности переходного процесса.

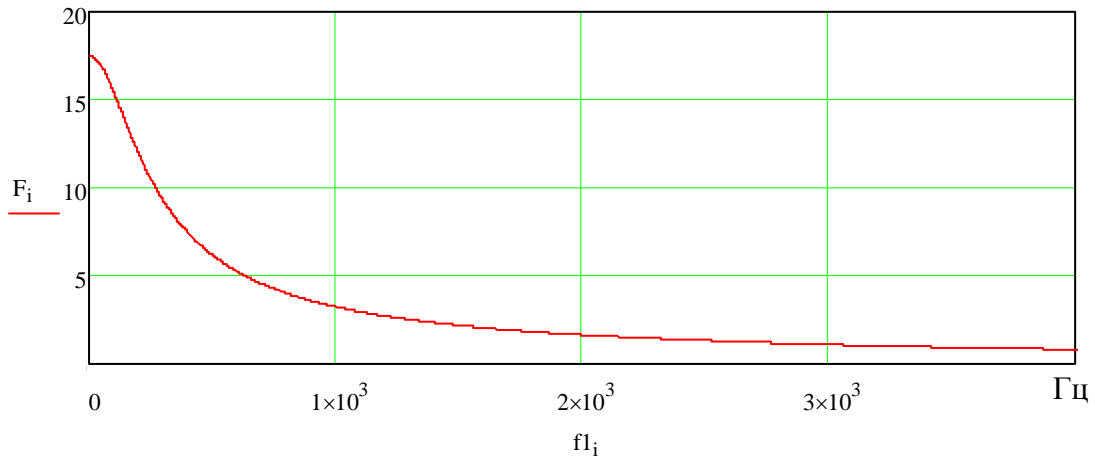


Рис. 6. Модуль спектральной плотности переходного процесса

Как уже отмечалось, амплитудный (энергетический) спектр появляется в момент начала переходного процесса, вызванного к. з. Поэтому устройства защиты от токов к.з., построенные на основе датчиков, реагирующих на появление энергетического спектра, позволяют свести время реакции защиты до предельного минимума. При этом не важно, какое напряжение в электрической сети, переменное или постоянное.

Собственно энергетический спектр является производной переходного процесса, поэтому время появления энергетического спектра совпадает с началом переходного процесса и с моментом возникновения к.з.

Изложенное выше позволяет сделать вывод о том, что время реакции будет определяться возможностями самого датчика, реагирующего на энергетический спектр переходного процесса, схемой его построения.

На первый взгляд теоретическая реализация такого датчика, с требуемым временем реакции, не представляет проблем. Вопросы могут возникнуть только на этапе практического применения, но и они могут быть успешно решены.

На рис. 7, а и рис. 7, б показаны два возможных варианта конструктивного исполнения бесконтактных датчиков тока к.з.

Сигналы с датчиков подаются на пороговое устройство и далее. Сигнал с порогового устройства подается на исполнительное устройство.

Провода сети должны быть пространственно разнесены, чем дальше, тем лучше. Иначе, расстояние между проводами сети и датчиками должно быть меньше, чем расстояние между проводами сети.

Датчики по рис. 7, а это плотная обмотка вокруг проводов сети, датчики по рис. 7, б вплотную проложены вдоль проводов сети и примотаны изолирующей лентой к ним. Провода сети могут быть изолированы, но не

должны быть экранированы. Допустима совместная экранировка каждого из датчиков и соответствующих проводов сети.

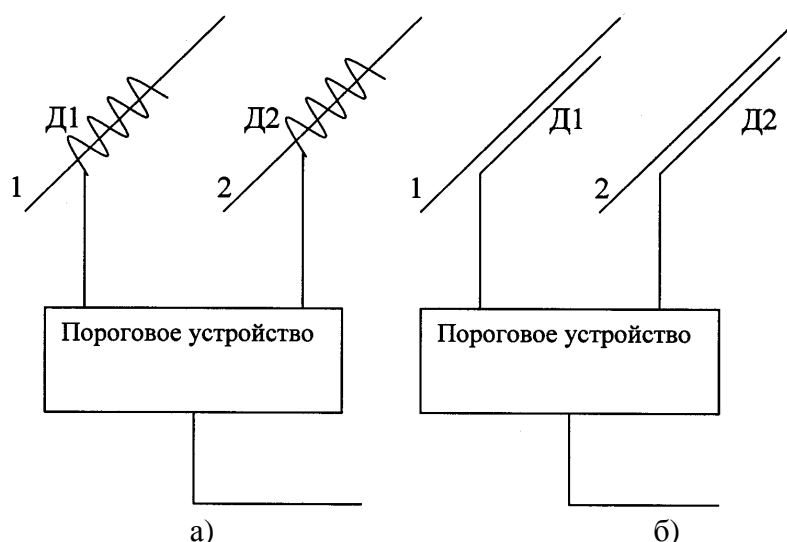


Рис. 7. Варианты исполнения бесконтактных датчиков:

а) – спиральный;

б) – линейный;

1 и 2 – провода промышленной сети;

Д1 и Д2 – датчики

Возникновение к.з. приводит к резкому падению напряжения и резкому возрастанию тока в проводах сети. Оба эти процесса приводят к резкому возрастанию электромагнитного излучения проводами сети и появлению как гармонических составляющих, кратных частоте промышленной сети, так и паразитного частотного спектра, сопровождающего любой переходной (нестационарный) процесс.

Пороговое устройство, реагирующее на гармонические составляющие и паразитный спектр, позволит существенно уменьшить время реакции на появление к.з., т.е. повысит быстродействие защиты.

Схема порогового устройства для управления предохранителями на электрогидравлической основе приведена на рис. 8.

При этом на основе конденсаторов и индуктивностей реализованы фильтры верхних частот с частотой среза несколько более 200 Гц. Оперативные усилители усиливают слабые сигналы частотного спектра, возникающие в момент возникновения к.з. Усиленные сигналы выпрямляются, и постоянное напряжение дополнительно усиливается операционным усилителем U4 и подается на исполнительное устройство отключения питания. На входе U4 может быть установлено пороговое устройство, с помощью которого можно минимизировать вероятность

ложных срабатываний, однако это на 10 ÷20% увеличит время реакции схемы на возникновение к.з.

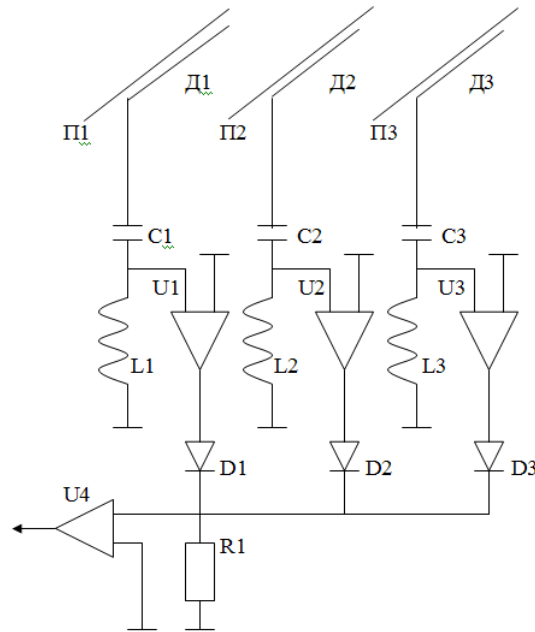


Рис. 8. Схема порогового устройства:

П1, П2, П3 – провода кабеля; Д1, Д2, Д3 – бесконтактные датчики тока к.з.;
С1, С2, С3 – конденсаторы; U1, U2, U3, U4 – операционные усилители;
L1, L2, L3 – индуктивности; D1, D2, D3 – детекторы; R1 – резистор

Конструктивное исполнение устройства защиты показано на рис. 9.

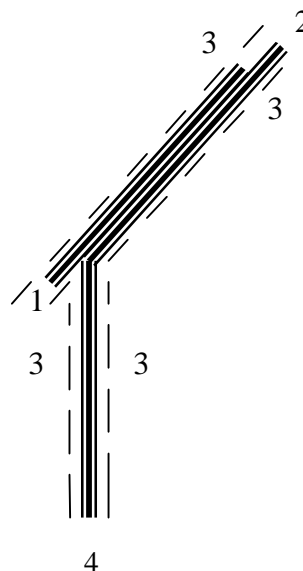


Рис. 9. Конструкция бесконтактного датчика съема информации об энергетическом спектре переходного процесса, возникающего в момент к. з.:

1 – жила кабеля с изоляцией; 2 – провод датчика в изоляции, проложенный параллельно жиле кабеля и приклеенный или примотанный к ней липкой изоляционной лентой; 3 – общий металлической экран, в который помещены элементы 1 и 2; 4 – контактный провод от провода датчика 2 к пороговому устройству (см. рис. 8), также в общем экране 3.

Экранировка проводов необходима для защиты от посторонних паразитных излучений, как-то, искрения щеток электродвигателей, контактов реле и т.п.

Пороговое устройство, показанное на рис. 8, должно быть расположено в металлическом экранированном корпусе. Все провода, подходящие к нему, должны быть тоже надежно экранированы.

В теории электромагнитного поля доказывается, что для провода 1 рис. 9, длиной l :

$$l \ll \lambda = \frac{2 \cdot \pi \cdot c}{\omega}, \quad (21)$$

где c – скорость света;
 ω – круговая частота.

Излучаемая мощность определяется из выражения:

$$P_{\Sigma} = k \cdot \omega^2 \cdot l^2 \cdot I^2, \quad (22)$$

где $k = 2\pi/\lambda$ – постоянная распространения;
 I – величина тока.

Исходя из теоремы взаимности для антенн, для провода 2 рис. 9, длиной l :

$$l \ll \lambda = \frac{2 \cdot \pi \cdot c}{\omega}. \quad (23)$$

Принимаемую мощность можно определить из выражения:

$$P_p = k \cdot \omega^2 \cdot l^2 \cdot I^2. \quad (24)$$

При расчетах постоянной времени бесконтактного датчика нас не интересует абсолютное значение принятого сигнала, в данном случае важна частотная характеристика коэффициента передачи энергии из сетевого провода в провод датчика.

Исходя из вышеизложенного и с учетом (23) и (24), выражение для относительной зависимости коэффициента передачи от частоты можно представить в виде:

$$K(f) = A \cdot f^6, \quad (25)$$

где A – коэффициент пропорциональности;
 $f = \omega/2\pi$ – частота.

С учетом активного сопротивления потерь R_{Π} последовательной цепи из емкости C и индуктивности L (см. рис. 8), выражение для коэффициента передачи на вход операционного усилителя U можно записать в виде:

$$K_U(f) = \frac{X_L}{\sqrt{R_{II}^2 + (X_L - X_C)^2}}, \quad (26)$$

где

$$X_L = \omega L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L,$$

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}.$$

Ранее было показано, что модуль спектральной плотности переходного процесса определяется из выражения:

$$F(f) = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{\tau_+}\right)^2 + (2 \cdot \pi \cdot f)^2}}, \quad (27)$$

где τ_+ – постоянная времени переходного процесса после возникновения к.з.

Перемножив выражения (25), (26) и (27), получим огибающую спектра переходного процесса на входе операционного усилителя:

$$F_{os} = K(f) \cdot K_U(f) \cdot F(f). \quad (28)$$

Подбирая оптимальное соотношение индуктивности L и емкости C , под каждый конкретный тип кабеля и конструктивное исполнение датчика возможно обеспечить максимальную ширину огибающей спектра Δf , что в соответствии с выражением

$$t_p = \frac{1}{\Delta f} \quad (29)$$

обеспечит минимальное время реакции t_p .

Результаты расчетов по выражению (28) представлены на рис. 10.

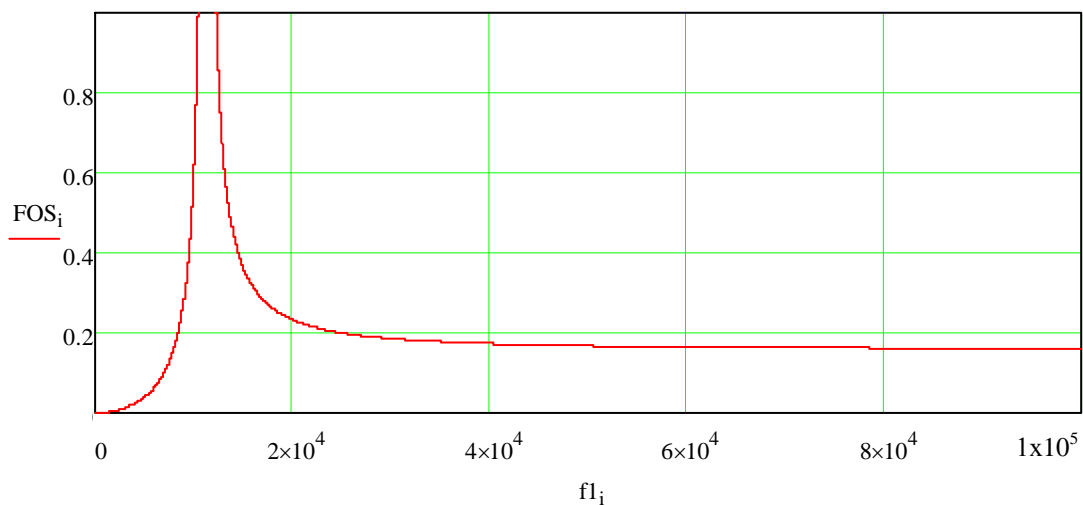


Рис. 10. Огибающая спектра переходного процесса для варианта входной цепи из L и C

Проведенные по полученным выражениям расчеты показывают, что возникают проблемы с резонансом последовательного контура из L и C , который может привести к возрастанию времени реакции, т.к. наличие резонанса приводит к сужению полосы частот.

Поэтому рассмотрим вариант схемы, в которой вместо индуктивности применен резистор R_{VX} , сопротивление которого может быть практически любым, сколь угодно большим. В связи с чем активным сопротивлением потерь R_{II} входной цепи можно пренебречь.

Исходя из вышеизложенного, выражение (26) примет следующий вид:

$$K_U(f) = \frac{R_{VX}}{\sqrt{R_{VX}^2 + X_C^2}}. \quad (30)$$

Результаты расчетов по выражению (28) с учетом (30) представлены на рис. 11.

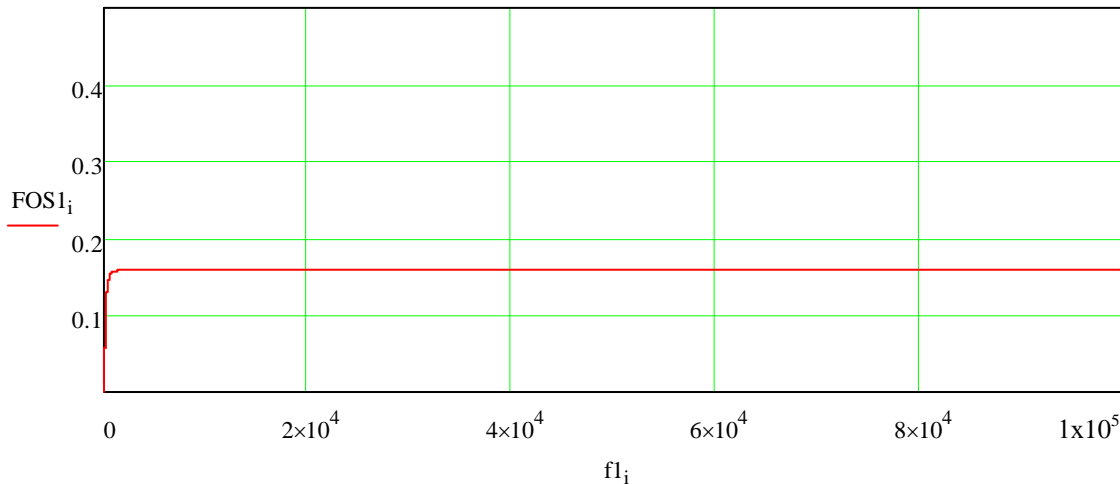


Рис. 11. Огибающая спектра переходного процесса для варианта входной цепи из R и C

Для второго варианта ограничений по полосе частот нет. Подбором значений R_{VX} и C можно обеспечить равномерную огибающую спектра. Поэтому время реакции должно быть минимальным.

По теории сам датчик имеет нулевое время реакции, т.е. $t_p \sim 0$, т.к. $\Delta f \rightarrow \infty$.

Как вариант, основной вклад в суммарное время реакции системы защиты вносится постоянной времени самих сетевых проводов.

ВЫВОДЫ

Таким образом, длина контакта провода датчика с сетевым проводом должна быть не менее 1 м, и определяется конструктивными осо-

бенностями конкретного силового кабеля и чувствительностью порогового устройства.

Создаваемая защита принципиально может применяться с любым видом защитной аппаратуры, но наибольший эффект с её помощью безусловно может быть получен с устройствами сверхбыстродействующего отключения, в частности, на электрогидравлической (электровзрывной) основе.

При упомянутом выше комплексе защитной системы аварийный элемент системы электроснабжения окажется отключенным до воспламенения им взрывоопасной окружающей среды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Диплом №388 на открытие. Российская академия естественных наук. Международная академия авторов научных открытий и изобретений. Явление возникновения бездуговой коммутация сильноточных высокопотенциальных электрических цепей / Брюханов А. М., Горошко И. П., Иорданов И. В., Громовой Н. А. – № А-489; заявл. 17.06.09
2. Bryukhanov A. M. Elektroblasting technology for short circuit current interruption in mine electrical networks. / A. M. Bryukhanov, I. V. Jordanov – // Nowoczesne metody eksploatacji węglaiskał zwięzłych. – Kraków, 2011. – Str. 21-27.
3. Брюханов А. М. Сверхбыстродействующая защитная аппаратура систем электроснабжения шахт – фактор снижения риска производства /Брюханов А. М., Иорданов И. В., Громовой Н. А. / Уголь Украины. – 2010. – №4. – С. 26-30.
4. Зернов Н. В. Теория радиотехнических цепей / Зернов Н. В., Карпов В. Г. – М. – Л.: Энергия, 1965. – 892 с.
5. Гликман И. Я. Расчет характеристик элементов цепей радиоэлектронной аппаратуры / Гликман И. Я., Русин Ю. С. М.: Сов. Радио, 1976. – 160 с.
6. Белорусов Н. И. Электрические кабели, провода и шнуры: справочник /[Н. И. Белорусов, А. Е. Саакян, А. И. Яковлева]; под ред. Н. И. Белорусова – М.: Энергоиздат, 1987. – 765с.

Получено: 30.11.2012 г.

Описано принципи й конструктивні особливості надшвидкодійного максимального струмового захисту нового покоління.

Захист призначено для сучасного застосування зі швидкодійною комутаційною апаратурою, а також з вимикачами традиційних типів (повітряними, вакуумними тощо).

Ключові слова: пристрій захисту, швидкодія, апарат комутаційний, струм короткого замикання, кабель, фаза комутації.

The principles and design features of ultrafast maximum current protection of new generation are described.

Protection is intended for modern application with the ultrafast switching equipment, and also with switches of traditional types (air, vacuum, etc.).

Key-words: protection device, ultrafast, switching equipment, short-circuit current, cable, phase of commutation.