

конструювання обладнання; проектування та розташування нових виробництв; реконструкції діючих виробництв; експертизи діючих виробництв і тих, що реконструюються та проектуються; розробки планів локалізації та ліквідації аварій; організації страхового захисту майна підприємств; розгляду конфліктів між суб'єктом господарювання, що експлуатує чи планує експлуатацію потенційно небезпечного об'єкту, та будь-якими зацікавленими сторонами, для яких аварії на об'єктах підвищеної небезпеки можуть мати негативні наслідки [10].

**Висновки і подальший напрямок досліджень.** Удосконалення системи управління охороною праці на гірничих підприємствах здійснюється шляхом підвищення діяльності відомчого нагляду і громадського контролю за її станом в межах державної політики щодо підвищення безпеки, гігієни праці і виробничої санітарії.

З метою комплексного розв'язання проблеми в сфері охорони праці на гірничих підприємствах, формування сучасного безпечного та здорового виробничого середовища передбачається підвищення діяльності структурних підрозділів з охорони праці шляхом впровадження механізму економічного стимулювання роботодавців і персоналу. Підвищення культури виробництва та загального рівня охорони праці на гірничих підприємствах досягається шляхом розроблення і впровадження сучасних технологій. Зменшення ризиків виробничого травматизму, професійних захворювань і аварій досягається за рахунок профілактичних заходів.

### Список літератури

1. Закон України «Про охорону праці». К.: Основа. 2004 – с. 28, 29.
2. Загальнодержавна соціальна програма поліпшення стану безпеки, гігієни праці та виробничого середовища на 2014-2018 роки. Відомості Верховної Ради України. К.: 2013. - С. 112.
3. **Спирин В.Ф.** УТАС: уверенные шаги вперед / **В. Ф. Спирин** // Технополис. – Дн-ск.: - 2014. – № 208. – С.14-19.
4. **Спирин В.Ф.** УТАС – новый уровень впровадження. УТАС: уверенные шаги вперед / **В. Ф. Спирин** // Технополис. – Д.: - 2014. – № 209. – С. 40-43.
5. ДСТУ OHSAS 18001:2010. Системи управління гігієною та безпекою праці. – К.: 2011. – С. 2.
6. **Фандєєв О.** Держгірпромнагляд: напрямок - європейські стандарти/ **О. Фандєєв** // Технополис. – Д.: - 2014. - № 212. – С. 6-13.
7. Постанова Кабінету Міністрів України від 11.07.2002 р. № 956. Про ідентифікацію та декларування безпеки об'єктів підвищеної небезпеки/ Урядовий кур'єр. – К.: - № 133. – 2002.
8. Закон України «Про об'єкти підвищеної небезпеки»/ Відомості Верховної Ради. – К.: № 15. – 2001. – с. 73.
9. Методика визначення ризиків та їх прийнятних рівнів для декларування безпеки об'єктів підвищеної небезпеки: Наказ № 637 Міністерство праці та соціальної політики від 04 грудня 2002. Основа. - К.: - 192 с.
10. **Бизов В.Ф., О.Є. Лапшин.** Охорона праці в галузі/ **В.Ф. Бизов, О.Є. Лапшин**// Мінерал. – Кривий Ріг.: 2001.

Рукопис подано до редакції 17.03.14

УДК 621.316.001.57

М.Л. БАРАНОВСКАЯ, В.К. ТЫТЮК, кандидаты. техн. наук, доц.  
Криворожский национальный университет

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ОЗЗ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ 6-35 кВ

На математической модели распределительной сети с изолированной нейтралью исследованы переходные процессы при горении перемежающейся дуги. Установлено, что на характер переходных процессов определяющее влияние оказывает сопротивление цепи замыкания на землю, которое состоит из суммы сопротивлений: сопротивления дуги и сопротивления пути обратного тока в земле или в оболочках кабелей. Доказано, что дуга является коммутатором и замыкает поврежденную фазу на землю через некоторое установившееся сопротивление  $R$ . При анализе корней характеристического уравнения видно, что свободная составляющая в переходном процессе имеет две составляющих: апериодическую и периодическую, величина амплитуд которых зависит от значения сопротивления цепи замыкания на землю. В зависимости от величины переходного сопротивления переходные процессы могут протекать с одним или несколькими переходами тока через нуль; существуют такие значения переходного сопротивления, которые являются границами между одним и двумя высокочастотными переходами тока через нуль. Известные теории развития перенапряжений следует рассматривать как частные случаи предложенной обобщенной теории, в которой гашение дуги возможно при первом или последующих переходах тока ОЗЗ через нуль, а повторные зажигания дуги в первоначальных циклах горение-гашение - при постоянном напряжении.

**Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.** Однофазные замыкания на землю (ОЗЗ), возникающие в распределительных сетях 6-10 кВ с изолированной нейтралью являются преобладающим видом повреждений и составляют более 75 % от общего числа повреждений. Перенапряжения при ОЗЗ снижают электрическую прочность изоляции кабелей, приводят к их пробой, множественным повреждениям. Это вызывает отказ в работе электрооборудования, длительные простои технологического оборудования, дополнительные расходы на его восстановление и, в конечном счете, к уменьшению производительности предприятия [1,2].

**Анализ исследований и публикаций.** В распределительных сетях 6-35 кВ с изолированной нейтралью однофазные замыкания на землю (ОЗЗ) вызывают перенапряжения. Известны несколько теорий развития перенапряжений: Петерсена, Петерса и Слепяна, Н.Н.Белякова [3-5].

В реальных сетях переходные процессы в различные моменты времени могут соответствовать каждой из теорий и определяться параметрами сети (индуктивность  $L$ , емкость фаз относительно земли  $C$ , междуфазная емкость  $C_m$  и др.) и параметрами в цепи замыкания на землю (активное сопротивление в цепи  $R$ ).

**Постановка задачи.** Для определения областей параметров, в которых процесс развивается по той или иной теории в поврежденной фазе при дуговых ОЗЗ, проведены расчеты на математической модели симметричной трехфазной сети.

**Изложение материала и результаты.** Сопротивления цепи замыкания на землю состоит из суммы сопротивлений: сопротивления дуги  $R_d$  и сопротивления пути обратного тока в земле или в оболочках кабелей  $R_o$ .

Сопротивление дуги является нелинейным и его установившееся значение зависит от многих факторов, которые определяются не только параметрами сети  $L$  и  $C$ , но и средой, в которой горит дуга. Величина сопротивления  $R_o$  зависит от конструктивного исполнения ЛЭП, характера и места повреждения.

В кабельных сетях около 90 % обратного тока протекает по оболочкам кабелей и  $R_o$  может составлять несколько Ом. Сопротивление дуги в процессе горения изменяется нелинейно и зависит от тока дуги.

Время перехода от токов замыкания к токам пробоя - микросекунды, следовательно, процесс загорания дуги протекает очень быстро и изменение  $i=f(U)$  происходит по динамической вольтамперной характеристике.

Сопротивление дуги падает быстрее, чем растет ток. Практически сопротивление в дуге уменьшается очень быстро до установившегося значения, что позволяет рассматривать переходный процесс в сети с сопротивлением  $R$ , равным сумме установившегося сопротивления дуги и сопротивления цепи замыкания на землю.

Таким образом, дуга является коммутатором и замыкает фазу на землю через некоторое установившееся сопротивление  $R$ .

В литературе приведено интегральное распределение сопротивлений в месте замыкания в сетях железорудных карьеров, из которого следует, что вероятность возникновения ОЗЗ через различные сопротивления неодинакова.

Наибольшая вероятность возникновения ОЗЗ с переходным сопротивлением 0-200 Ом. В [88] производилось экспериментальное измерение сопротивления каналов дуги при пробое или перекрытии изоляции.

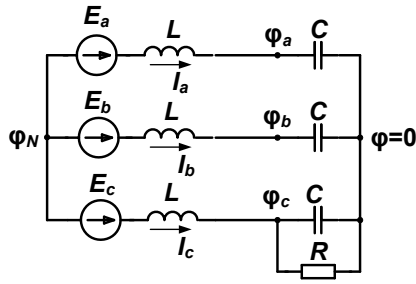
При этом установлены зависимости между сопротивлением дуги и емкостью сети и делается вывод о том, что в характере протекания переходного процесса определяющим фактором является величина активного сопротивления в цепи ОЗЗ, следовательно, этот же фактор определяет уровни перенапряжений при перемежающейся дуге.

Сопротивление в цепи ОЗЗ обуславливает затухание амплитуд токов и напряжений поврежденной и неповрежденных фаз, а также определяет полноту замыкания на землю.

В математических моделях авторы принимали сопротивление цепи замыкания на землю разным по величине: 1000 Ом,  $4 \div 12$  Ом,  $1 \div 10$  Ом.

В одном источнике сопротивление оцениваются  $R_o=4,12,50,60,80,500$  Ом, а в другом - сопротивлением дугового промежутка предложено пренебречь, поскольку оно небольшое (в пределах нескольких Ом) по сравнению с сопротивлением фаз относительно земли и сопротивлением фаз трансформатора напряжения.

Для исследований перенапряжений в качестве модели сети принята схема замещения (рис. 1).



**Рис. 1.** Схема замещения трехфазной сети с изолированной нейтралью:  $C$  - емкости фазы относительно земли;  $L$  - эквивалентная индуктивность фазы;  $R$  - суммарное активное сопротивление цепи замыкания на землю;  $e_a, e_b, e_c$  - фазные э.д.с. источника;  $\varphi_a, \varphi_b, \varphi_c$  - потенциалы фаз относительно земли;  $\varphi_N$  - потенциал нулевой точки источника

Схема замещения описывается системой дифференциальных уравнений

$$\left. \begin{aligned} C \frac{d\varphi_a}{dt} + \frac{1}{L} \int \varphi_a dt - \frac{1}{L} \int \varphi_N dt &= \frac{1}{L} \int e_a dt; \\ C \frac{d\varphi_b}{dt} + \frac{1}{L} \int \varphi_b dt - \frac{1}{L} \int \varphi_N dt &= \frac{1}{L} \int e_b dt; \\ C \frac{d\varphi_c}{dt} + \frac{1}{L} \int \varphi_c dt + \frac{1}{R} \varphi_c - \frac{1}{L} \int \varphi_N dt &= \frac{1}{L} \int e_c dt; \\ \frac{3}{L} \int \varphi_N dt - \frac{1}{L} \int \varphi_a dt - \frac{1}{L} \int \varphi_b dt - \frac{1}{L} \int \varphi_c dt &= -\frac{1}{L} \int (e_a + e_b + e_c) dt, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Характеристическое уравнение данной системы

$$p^3 + \frac{1}{CR} p^2 + \frac{1}{LC} p + \frac{1}{3LC^2 R} = 0. \quad (2)$$

Решением уравнения (2) являются один действительный и два комплексно-сопряженных корня

$$p_1 = -\omega_0 \frac{1}{3R_*} (1 - \alpha_* - \beta_*); \quad p_{2,3} = -\omega_0 (\delta_* \pm j\omega_{k*}),$$

где  $\omega_0 = \frac{1}{LC}; R_* = \frac{R}{\rho}; \rho = \sqrt{\frac{L}{C}}; \alpha_* = \sqrt[3]{-1 + 3\sqrt{3}R_*^2 \sqrt{R_*^2 + \frac{1}{3R_*^2}} - 1};$

$$\beta_* = \sqrt[3]{-1 - 3\sqrt{3}R_*^2 \sqrt{R_*^2 + \frac{1}{3R_*^2}} - 1}; \quad \delta_* = -\frac{1}{3R_*} \left( 1 + \frac{\alpha_*}{2} + \frac{\beta_*}{2} \right);$$

$$\omega_{k*} = \frac{1}{2\sqrt{3}R_*} (\alpha_* - \beta_*).$$

Анализируя корни видно, что свободная составляющая в переходном процессе имеет две составляющих: аperiodическую  $A_1 e^{p_1 t}$  и периодическую  $A_2 e^{\delta_* t} \sin(\omega_{k*} t + \nu)$ , величина амплитуд которых зависит от значения  $R$  [6,7].

При исследовании установлено, что амплитуда периодической составляющей  $A_2$  не зависит от параметров  $L, C$  в любом диапазоне частот собственных колебаний; а зависит от значения  $R_*$  и момента замыкания на землю; амплитуда аperiodической составляющей  $A_1$  практически не зависит.

В зависимости от величины переходного сопротивления  $R_*$  переходные процессы могут протекать с одним или несколькими переходами тока через нуль; существуют такие значения  $\tilde{R}_*$ , которые являются границами между одним и двумя высокочастотными переходами тока через нуль. От частоты  $\omega_0$  для  $R_* < \sqrt{3}/2$ .

Зависимость  $\tilde{R}_* = f(f_0)$  представлена в [6]. Если  $R_* < \tilde{R}_*$ , то режим можно характеризовать как колебательный, поскольку за время полупериода сети будет два и более высокочастотных переходов тока замыкания через нуль. Если  $R_* > \tilde{R}_*$ , то режим можно характеризовать одним высокочастотным переходом тока замыкания через нуль.

При значениях  $R_*$ , лежащих выше кривой «*авв2*» [6], будет лишь один переход тока ОЗЗ через нуль, при  $R_*$ , лежащих ниже этой кривой - два и более высокочастотных переходов через нуль.

Величина времени от момента зажигания дуги до момента первого перехода тока ОЗЗ через нуль в поврежденной фазе  $t_{01}$  и коэффициент затухания переходного процесса  $k_g = e^{\delta t_{01}}$  определены в работе [6].

Вероятность гашения дуги и уровни перенапряжений зависят от скорости изменения тока при переходе через нуль.

Увеличение этой скорости уменьшает вероятность появления перенапряжений. С увеличением сопротивления цепи замыкания на землю  $R_*$  скорость изменения тока при переходе через нуль уменьшается.

Выполнены расчеты при горении дуги при изменении параметров распределительной сети в широком диапазоне ( $f_0=250\div 2250$  Гц) и цепи ОЗЗ ( $R R = 0 \div 100$  Ом).

**Выводы и направление дальнейших исследований.** 1. В предыдущих исследованиях не в полной мере учитывались фактические параметры распределительных сетей и сопротивление цепи замыкания на землю и не представлялось возможным с необходимой точностью разработать комплекс мер по ограничению перенапряжений при ОЗЗ, влияние которых приводит к преждевременному выходу из строя электрооборудования, длительному простоем технологического оборудования, повышению эксплуатационных расходов на его восстановление и снижению производительности предприятий в целом.

2. Разработанная математическая модель распределительной сети 6-35 кВ позволила с помощью математического аппарата оценить значимость и влияние сопротивления цепи замыкания на землю на характер протекания переходных процессов при ОЗЗ.

3. В сетях с высокой частотой собственных колебаний свободные составляющие затухают, как правило, за время меньше четверти периода сети ( $T_c/4$ ), а в сетях с низкой частотой собственных колебаний переходный процесс длится значительно большее время  $(0,5-1,5)T_c$ , длительность которого определяется сопротивлением цепи замыкания  $R_*$ .

4. В области частот собственных колебаний  $f_0 > 529,3$  Гц при  $R_* > \tilde{R}_*$  к моменту перехода тока через нуль переходный процесс полностью затухает. Это подтверждает, что при данных значениях  $R_*$  переходный процесс может развиваться по теории Петерса и Слепяна.

При значениях  $R_*(R_* < 0,23)$  во всем диапазоне частот собственных колебаний погасание дуги может произойти при первом, втором или третьем переходе через нуль.

Переходный процесс может развиваться как по теории Петерсена, так и по теории Белякова, в зависимости от характера процесса восстановления.

5. В области частот  $529,3 < f_0 < 1424,5$  Гц для  $R_*$ , ограниченных кривыми «аб» и «бв» [6], переходной процесс имеет колебательный характер (по теории близкой к теории Петерсена).

6. Принимая, что гашение дуги происходит в процессе некоторого  $n$ -го перехода тока ОЗЗ через нуль при постоянном напряжении зажигания дуги в нескольких начальных циклах горения-гашения, известные теории развития перенапряжений можно рассматривать как частные случаи данной теории [7].

#### Список литературы

1. Серов В.И., Щуцкий В.И., Ягудаев Б.М. Методы и средства борьбы с замыканием на землю в высоковольтных системах горных предприятий. М.: Наука, 1985.
2. Беляков Н.Н. Исследование перенапряжений при дуговых замыканиях на землю в сетях 6 и 10 кВ с изолированной нейтралью. Электричество, 1957. - №5, С. 31-36.
3. Лихачев Ф.А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов. -М.: Энергия, 1971. -152 с.
4. Базуткин В.В., Ларионов В.П., Пинталь Ю.С. Техника высоких напряжений. Изоляция и перенапряжения в электрических системах. - М.: Энергоатомиздат, 1986. - 464 с.
5. Щуцкий В.И., Жидков В.О., Ильин Ю.Н. Защитное шунтирование однофазных повреждений электроустановок. - М.: Энергоатомиздат, 1986. -152 с.
6. Барановская М.Л. Моделирование переходных процессов в поврежденной фазе при замыкании на землю // Книга за матеріалами четвертої міжнар. конф. "Контроль і управління в технічних системах" (КУТС-97). - Том 1. - Вінниця: "УНІВЕРСУМ-Вінниця", - 1997. - С. 116-122.
7. Барановская М.Л., Иончиков А.Н. Анализ теорий оценки уровней перенапряжений при дуговых замыканиях на землю // Вісник Криворізького технічного університету. – Кривий Ріг: КТУ, 2006.-№90. –С.184-187.

Рукопись поступила в редакцию 17.03.14