

АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ДУГОВЫХ ЗАМКЯНИЙ НА ЗЕМЛЮ В СЕТЯХ СОБСТВЕННЫХ НУЖД ТЭС И АЭС

Сивокобыленко В.Ф., Лебедев В.К., Махинда Сильва
Донецкий государственный технический университет

The results of accounts of transients are given at arc short circuit of a phase on ground in networks with isolated and resistor earthed neutral. It is shown, that resistor the grounding neutral limits possible overvoltage in a network up to 2-2,5Un instead of 3-4,5Un, however in networks of own needs thermal power plant and atomic power stations the modes are possible when it does not decide a problem of restrictions overvoltage, if the responsible connections should not be disconnected by protection and short circuits on ground.

Сети собственных нужд напряжением 6 кВ подавляющего большинства современных электростанций работают в режиме с изолированной нейтралью. Как известно, в сетях с изолированной нейтралью замыкание фазы на землю не является коротким замыканием и не требует немедленного отключения [1], что позволяет сохранить работоспособность этих сетей при длительных замыканиях фазы на землю путем определения, выделения и отключения места повреждения, а также создания временной схемы питания потребителей без их обесточивания. Преимуществом полностью изолированной нейтрали сети является также простота реализации такого режима, поскольку при этом отпадает необходимость в специальных устройствах для заземления нейтрали. Однако полностью изолированной нейтралью свойственны весьма серьезные недостатки, основным из которых является возможность возникновения перемежающихся дуговых замыканий фазы на землю, сопровождающихся большой кратностью перенапряжений на элементах сети. Совместное воздействие заземляющей дуги и перенапряжений создаёт весьма тяжелые условия для работы изоляции. Термическое действие дуги и перенапряжения зачастую однофазные замыкания на землю переводят в многофазные короткие замыкания или многоместные пробоя изоляции на поврежденной фазе с групповым выходом из строя электрооборудования. При этом повреждаются в основном электродвигатели, обладающие, как известно, меньшими запасами электрической прочности, и кабели. По данным опыта эксплуатации 60-80% однофазных замыканий в сетях 6-10 кВ развиваются в междуфазные короткие замыкания или в многоместные пробоя изоляции [2]. Причем в пределах до 40% из них происходят по причине термического действия дуги в сетях с повышенным током замыкания на землю и более 60% обусловлены пробоем изоляции при воздействии дуговых перенапряжений, чаще всего в сетях с током замыкания до 10 А, характерного для сетей собственных нужд электростанций.

Поскольку в настоящее время отсутствуют надежные средства защиты электрооборудования сетей собственных нужд от последствий однофазных замыканий на землю, то одним из успешных решений указанной проблемы может быть найдено путем оптимизации управления режимом нейтрали, обеспечивающем максимальное ограничение амплитуды и длительности всех возможных повышений напряжения и снижение до минимума тепловых потерь в месте пробоя изоляции.

Данная работа посвящена анализу процессов при однофазных замыканиях на землю с помощью метода математического моделирования. За основу была принята математическая модель, описанная в [3], которая позволяет моделировать указанные выше явления при различных значениях параметров кабельной сети, трансформаторов, двигательной нагрузки и режима работы нейтрали сети.

Как известно, наибольшие перенапряжения при замыкании фазы на землю могут возникать, если момент замыкания происходит в максимум напряжения поврежденной фазы, а погасание дуги — при переходе через “ноль” высокочастотной составляющей тока замыкания или составляющей промышленной частоты. На рис. 1 приведена осциллограмма многократных пробоев фазы С на землю при $t_1=0,005\text{с}$, $t_2=0,015\text{с}$, $t_3=0,025\text{с}$, $t_4=0,035\text{с}$, $t_5=0,045\text{с}$ в момент максимума напряжения на поврежденной фазе С и погасаний дуги при первом переходе через “ноль” тока высокочастотных колебаний. Из осциллограммы следует, что при первом замыкании фазы на землю напряжения на здоровых фазах не превышают $2,5U_{\phi}$, но при последующих пробоях напряжения здоровых фаз возрастают до $4,6U_{\phi}$, т. е. при таком виде замыкания происходит процесс эскалации напряжений. Аналогичным образом происходит нарастание напряжения на поврежденной фазе (от 2,6 до $3,8U_{\phi}$) и напряжения смещения нейтрали (от 1,57 до $3U_{\phi}$). Параметры сети мало сказываются на кратности перенапряжений, заметно влияя только на частоту высокочастотных колебаний и амплитуду броска тока в месте замыкания. Анализ перенапряжения для случая погасания дуги при переходе через “ноль” тока промышленной частоты и замыканиях на максимуме напряжения поврежденной фазы показал, что при первом замыкании фазы на землю напряжения на здоровых фазах не превышают $2,5U_{\phi}$, а при повторных пробоях увеличивается до $(3,2-3,3)U_{\phi}$, оставаясь в дальнейшем неизменным. Таким образом увеличение кратности напряжений выше $3U_{\phi}$ на здоровых фазах в режимах дугового замыкания фазы на землю является причиной пробоя изоляции в других точках сети и возникновению многофазных коротких замыканий.

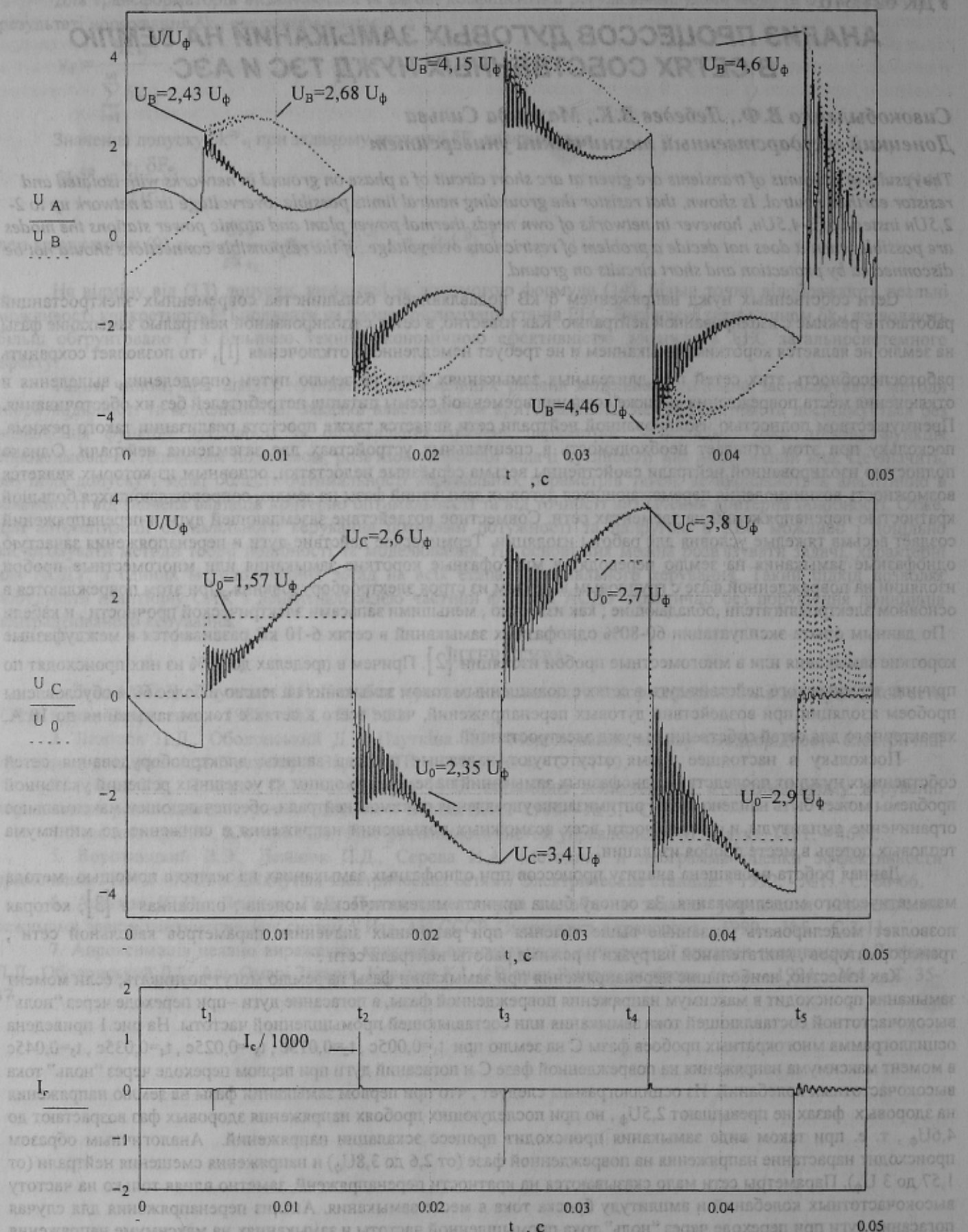


Рисунок 1 - Замыкание фазы C на землю и погасание дуги при первом переходе через "ноль" тока высокочастотных колебаний ($C=3\text{мкФ}$, $I_{C2}=9\text{А}$)

В условиях отсутствия надежных средств защиты сетей собственных нужд ТЭС и АЭС от последствий однофазных замыканий на землю, ведется поиск эффективного решения проблемы повышения надежности работы оборудования собственных нужд в таких режимах. Поэтому в последние годы были разработаны ведомственные циркуляры, предписывающие перевод сетей собственных нужд ТЭС и АЭС из режима с изолированной нейтралью в режим с частичным заземлением через небольшое активное сопротивление, устанавливаемого в нейтрали специального присоединительного трансформатора. Первоначально величина этого токоограничивающего резистора была принята 100 Ом, что предполагало ограничение величины перенапряжений и обеспечение надежной работы релейной защиты от однофазных замыканий на землю. На рис. 2 приведена осциллограмма дугового замыкания фазы С на землю при наличии присоединительного трансформатора мощностью 63кВА и величиной резистора в его нейтрали равной 100 Ом. Как видно из рис.2 применение токоограничивающего резистора позволяет снизить кратности перенапряжений на здоровых фазах А и В до величины $2,38 U_{\phi}$. Однако, как показал опыт эксплуатации, внедрение этого мероприятия не привело к заметному повышению надежности работы сетей 6 кВ собственных нужд электростанций, что свидетельствует о слабой изученности этого вопроса и отсутствии строгого научного обоснования для технической реализации данного способа. Так, до сих пор, из-за отсутствия обоснованной методики дискуссионным остается вопрос выбора величины сопротивления заземляющего резистора.

Например, по результатам последних исследований [4] с целью снижения термического действия дуги в месте замыкания фазы на землю и повышения термостойкости самого резистора рекомендовано применять высокоомный резистор величиной 1000 Ом. Не исследованы вопросы о последствиях существенного увеличения тока замыкания на землю в сети с заземлением нейтрали через небольшое активное сопротивление и надежности срабатывания релейной защиты от однофазных замыканий, выполненной на базе простых электромеханических реле. Для восполнения данного пробела были проведены исследования на математической модели режимов дуговых замыканий на землю при разных величинах сопротивления резистора, мощности присоединительного трансформатора, суммарной емкости сети и различном повторном напряжении пробоя поврежденной фазы. Как видно на рис. 3 кратности перенапряжения существенно зависят от условий гашения дуги и величины суммарной емкости сети. Для реальных сетей ТЭС и АЭС, где токи замыкания за землю, как правило, не превышают 20 А, можно рекомендовать установку резистора величиной до 400 Ом, при этом максимальные кратности перенапряжений не будут превышать $2,7 U_{\phi}$ при одновременном снижении термического действия дуги в месте замыкания и повышения термической стойкости самого резистора.

В табл. приведены результаты моделирования дугового замыкания на землю при различных значениях напряжения повторного пробоя, емкости сети и возможном значении активного сопротивления дуги в месте замыкания R_z . Анализ приведенных в табл. результатов показывает, что при сопротивлении резистора 100 Ом количество пробоев дугового промежутка за один период промышленной частоты может колебаться от 2 до 15 в зависимости от емкости сети и величины пробивного напряжения. При сопротивлении резистора 100 Ом количество пробоев дугового промежутка не зависит от емкости сети, величина же среднеквадратичного тока замыкания $I_{ср.кв}$ за один период возрастает с увеличением суммарной емкости сети и не зависит от величины пробивного напряжения дугового промежутка.

Аналогичные исследования, проведенные для присоединительного трансформатора мощностью 630 кВт показали, что увеличение на порядок мощности присоединительного трансформатора практически не сказывается на кратности перенапряжений, количестве пробоев дугового промежутка и среднеквадратичном значении тока замыкания.

Отметим также, что применяемые решения [5], в отношении резистивного заземления нейтрали, не исключают работу сети собственных нужд с полностью изолированной нейтралью, когда, например, замыкание возникает на ответственном присоединении, которое согласно правил безопасности не подлежит отключению. В этих случаях отключается присоединительный трансформатор вместе с заземляющим резистором и в сети возможны длительные дуговые замыкания. Устранение этих недостатков требует дальнейших анализов и разработок.

Анализ полученных в данной работе результатов позволяет сделать вывод о том, что наличие особенностей в характере переходных процессов в сети с резистивно заземленной нейтралью, где частотные параметры тока и напряжения могут меняться в широких пределах, может быть причиной того, что широко распространенные в настоящее время в сетях с.н. электростанций реле РТЗ – 51 (РТЗ-50, РТ – 40/0,2) в условиях часто повторяющихся пробоев, так называемых клевков, не успевают успешно сработать, и могут находиться в таком состоянии длительное время даже при больших токах замыкания на землю. Хотя и небольшое по величине, но длительно действующие в этом случае перенапряжения могут вызвать повреждение электрооборудования сети. Исходя из изложенного можно заключить, что резистивное заземление нейтрали сети собственных нужд электростанций не исключает возможности повреждения электрооборудования в условиях неустойчивого горения дуги, что и подтверждается в эксплуатации.

К числу недостатков резисторного заземления сети 6 кВ следует также отнести низкую термостойкость бѐтелового резистора при его величине 100-400 Ом, т.к. допустимая длительность замыкания на землю при этом не превышает 1,2 минуты. По истечении этого времени присоединительный трансформатор должен быть отключен и сеть переводится в режим с изолированной нейтралью со всеми присущими ей недостатками.

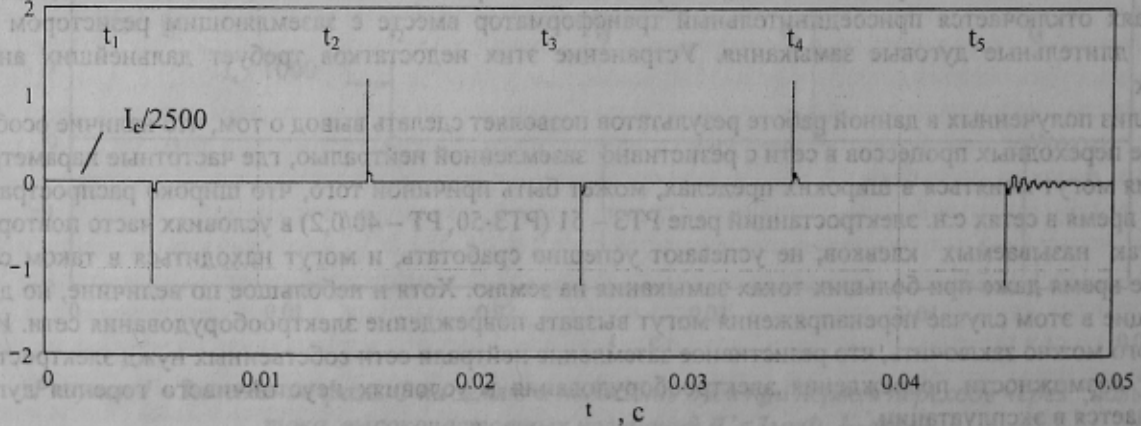
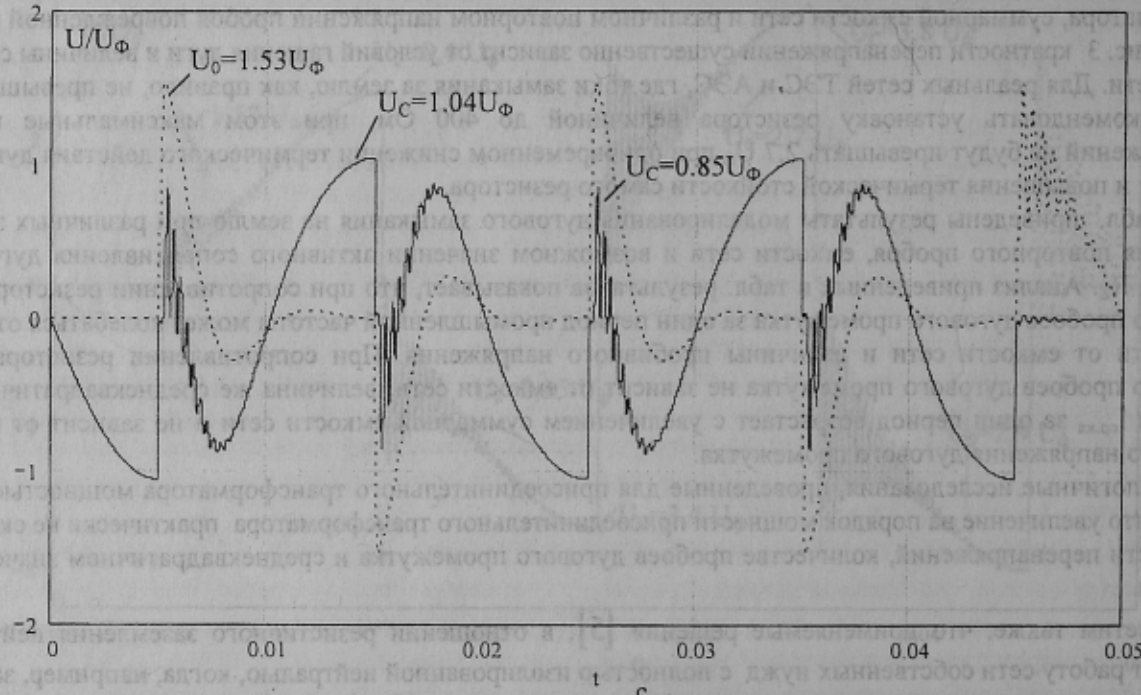
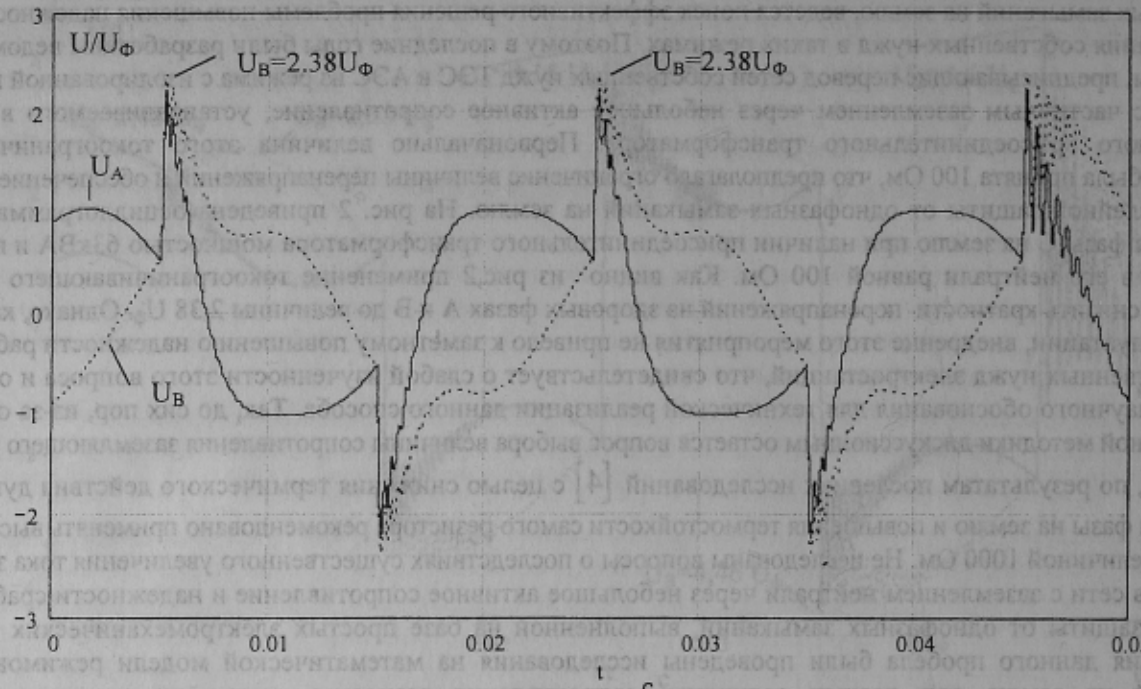


Рисунок 2 – Замыкание фазы C на землю и погасание дуги при первом переходе через "ноль" тока высокочастотных колебаний ($R_D = 100 \text{ Ом}, C = 3 \text{ мкФ}, I_{CS} = 9 \text{ А}$)

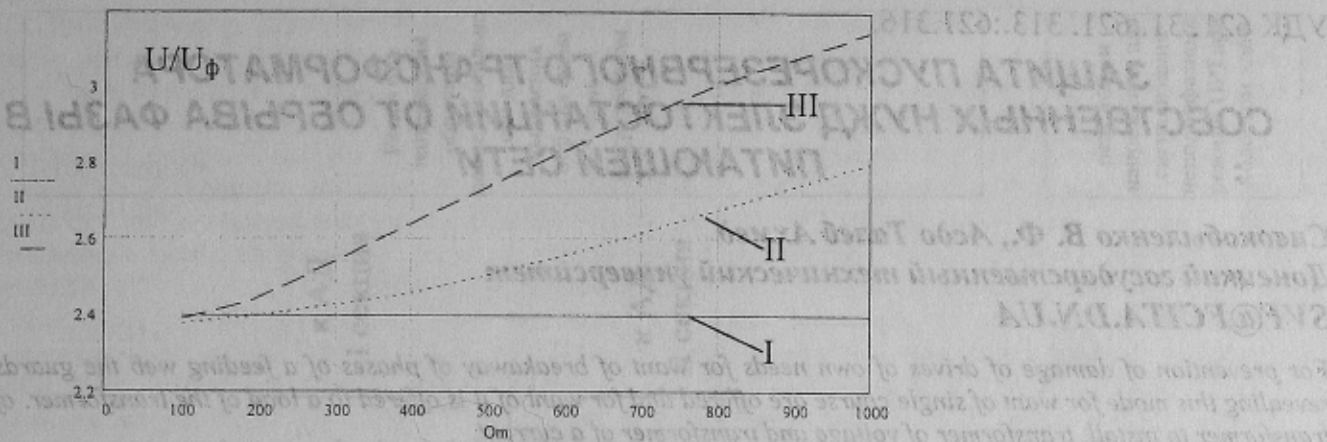


Рисунок 3 – Зависимости кратности перенапряжений от величины сопротивления резистора в нейтрали присоединительного трансформатора при пробоях на максимуме напряжения поврежденной фазы
 I – гашение дуги при “ноле” промышленной частоты ($C = 3; 5,25$ мкФ), II – гашение дуги при “ноле” в/ч колебаний ($C = 3$ мкФ; $I_{C\Sigma} = 9$ А), III – гашение дуги при “ноле” в/ч колебаний ($C = 5,25$ мкФ; $I_{C\Sigma} = 18$ А).

Таблица - Дуговое замыкание фазы на землю при заданных значениях напряжения пробоя и гашение дуги при первом переходе через “ноль” тока высокочастотных колебаний

$S_{тр}$ кВА	$R_{д}$ Ом	C , мкФ	$U_{пр}$, В	Кол-во пробоев	$I_{ср.кв.}$ А ($R_z=0.50\Omega$)	$I_{ср.кв.}$ А ($R_z=40\Omega$)
63	100	2	3000	15	104,07	64,46
	400			5	66,95	39,36
	1000			5	67,01	40,59
	100	6	3000	7	169,85	82,89
	400			5	152,88	75,91
	1000			5	153,24	76,86
	100	2	4900	5	94,38	54,47
	400			2	66,88	42,20
	1000			2	66,99	42,34
100	6	4900	2	153,7	82,83	
400			2	154,06	83,24	
1000			2	153,57	83,57	

Выводы:

1. Резистивное заземление нейтрали присоединительного трансформатора позволяет ограничить перенапряжения до 2,2 -2,4 U_{ϕ} в сети с.н. 6кВ.
2. Для конкретных сетей с.н. в зависимости от величин емкостного тока требуется выбор оптимальной величины заземляющего резистора и оценка его влияния на перемежающуюся дугу с учетом его термостойкости.
3. Требуется дальнейшая разработка способов повышения надежности функционирования сетей с.н. ТЭС и АЭС, т.к. резистивное заземление и применяемая релейная защита не решают в полной мере проблему исключения перенапряжений при замыкании на землю через дугу.

ЛИТЕРАТУРА

1. Правила устройства электроустановок. – М.Энергоатомиздат, 1986г.
2. Лихачев Ф.А. Заземление на землю в сетях с изолированной нейтралью и компенсацией емкостных токов. М.,Энергия, 1971г.
3. Сивокобыленко В.Ф., Лебедев В.К., Махинда Сильва. Математическая модель для исследования переходных процессов при замыкании фазы на землю в сетях 6-10 кв. – Сб. научн. трудов ДонГТУ. Серия: электротехника и энергетика, вып.4:- Донецк: ДонГТУ, 1999г., с.221-226.
4. Евдокунин Г.А., Гудилин С.В., Корепанов А.А. Выбор способа заземления нейтрали в сетях 6-10 кв.- Электричество, 1998, № 12.
5. Циркуляр Ц-01-88. О повышении надежности сетей 6 кв. собственных нужд энергоблоков АЭС. – М., 1988.