

ВОЗНИКНОВЕНИЕ ФЕРРОРЕЗОНАНСА В ЦЕПЯХ 24 кВ ГЕНЕРАТОРНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ЭНЕРГБЛОКОВ АЭС

© 2018 С.А. Баран, В.В. Нечитайлов, В.В. Краснокутский

Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета МИФИ, Волгодонск, Ростовская обл., Россия

В работе производится анализ причин, приводящих к ложному срабатыванию защит и отключению энергоблоков АЭС, а также к повреждению измерительных трансформаторов напряжения, установленных в сети генераторного напряжения.

Рассматриваются причины, приводящие к появлению в сети феррорезонансных явлений и способ их устранения.

В сети генераторного напряжения АЭС наблюдался ряд аварийных отключений энергоблоков от сети действием защиты от замыкания на землю. Согласно проведенным расследованиям аварийных ситуаций часть из них оказалась ложной. Часто причиной ложных аварий является появление в сети феррорезонансных явлений, вызванных коммутацией нагрузки, кратковременным появлением дугового замыкания, а также рядом других причин.

При появлении феррорезонанса, общеизвестно, что в ряде случаев возможно появление высоких кратностей перенапряжений, опасных для трансформаторов напряжения, так и для межвитковой изоляции генератора.

В данной статье проанализированы возможности проявления феррорезонансных явлений в сети генераторного напряжения энергоблоков АЭС при различных аварийных режимах.

Ключевые слова: феррорезонанс, генераторное напряжение, изолированная нейтраль, трансформатор напряжения, перенапряжение.

Поступила в редакцию: 21.05.2018

По данным отечественных и зарубежных исследований, а также опыта эксплуатации, в сетях с изолированной нейтралью, чаще всего возникновение перенапряжений связано с неполнофазными режимами. Неполнофазный режим это не только явный обрыв фазного провода или перегорание предохранителя, но и те случаи, когда отключение ненагруженного понижающего трансформатора или электродвигателя происходит коммутационным аппаратом с одновременным отключением всех трех фаз. Если неодновременность отключения составляет 0,04 с (2 периода частоты 50 Гц) и более, то за это время успевают развиваться перенапряжения опасной величины. При неполнофазных режимах возникают феррорезонансные перенапряжения, которые превышают уровень изоляции электродвигателей. Они опасны для разрядников с шунтирующими сопротивлениями и ОПН, а также для трансформаторов напряжения своей длительностью, так как существуют столько времени – сколько существует неполнофазный режим [1]. Их опасность состоит еще и в том, что при неполнофазных режимах – наличие или отсутствие компенсации не влияет на вероятность возникновения и уровень перенапряжений [2–4], при этом установка защитных аппаратов на шинах бесполезна, так как перенапряжения возникают на отделенном от шин участке фазы (за обрывом фазы).

Ежегодно в энергосистемах страны по оценкам СО ЦДУ повреждается до 6-8% от числа установленных ТН в сетях с изолированной нейтралью. Повреждения происходят при воздействии на ТН перемежающейся дуги в тех случаях, когда зажигание и гашение дуги происходит один раз в период или реже, или когда возникает регулярная дуга с зажиганием один раз в период при напряжении только одной полярности. Повреждения ТН от воздействия феррорезонансных перенапряжений происходят практически после каждого случая образования схемы, приводящей к возбуждению

ФРП. Повреждения ТН происходят даже при наличии активных сопротивлений, включенных в схему разомкнутого треугольника.

Анализ причин повреждений ТН показывает, что ТН является достаточно надежным аппаратом и не повреждается ни по каким другим причинам, кроме воздействия режимов – на которые он не рассчитан. Таким режимом является длительное протекание по первичной обмотке ТН токов, величина которых значительно превышает величину тока, максимально допустимого по тепловой устойчивости изоляции обмотки.

Установлено, что такие токи возникают при феррорезонансных процессах в контуре, образующемся при определенных режимах сети, в которой установлен ТН. Возникновение ФРП становится возможным из-за явлений, вызывающих насыщение стали магнитопровода ТН. Это приводит к плавному изменению индуктивности обмотки ТН и при определенном соотношении параметров емкостей элементов сети, включенных последовательно и параллельно с ТН, возникает ФРП [5].

В разветвленных цепях с различной схемой соединения нелинейных катушек и емкостей возникают более сложные явления, которые невозможно рассматривать отдельно как феррорезонанс напряжений или токов. В общем случае феррорезонансные явления характеризуются скачкообразным переходом из режима сильного насыщения ферромагнитного сердечника катушки индуктивности в слабонасыщенный режим или наоборот. При этом возникают скачки напряжения и тока в режиме сильного насыщения. Таким образом, перенапряжения и протекание через обмотку токов, превышающих предельно допустимый ток, могут привести к тепловому разрушению изоляции обмотки и витковым замыканиям.

Необходимо различать несколько типов резонансных перенапряжений, развивающихся в сетях с изолированной нейтралью с электромагнитными ТН и приводящих к их повреждениям: дуговые перенапряжения, феррорезонанс при неполнофазных режимах сети и феррорезонанс, возникающий при коммутациях с ненагруженными линиями. Все три типа схожи по внешнему проявлению и последствиям: возникает смещение нейтрали сети, развиваются колебательные процессы на промышленной частоте либо на высших и низших гармониках, приводящие к перенапряжениям на линии и сверхтокам в трансформаторах напряжения и, как следствие, к перегреву и повреждению ТН [5]. Феррорезонанс во многих случаях являлся причиной возникновения пробоя изоляции на землю. С другой стороны, дуговые замыкания на землю часто приводят к возникновению и развитию феррорезонансных процессов.

В сетях 6-35 кВ замыкания фазы на землю в кабелях имеют место при относительно небольших расстояниях между фазой и заземленными элементами [6]. Дуга горит в узком пространстве при наличии газового дутья, то есть при достаточно интенсивной деионизации. После возникшего пробоя изоляции (чаще всего в момент близкий к максимуму напряжения поврежденной фазы) в сети идет переходный процесс и через место повреждения протекают высокочастотные свободные составляющие тока замыкания на землю.

Обрыв связи с землей происходит в результате погасания дуги, которая гаснет при прохождении тока дуги через нуль. Однако этот обрыв может происходить при первом или последующих переходах высокочастотного свободного тока через нуль. При переходе через нуль вынужденной составляющей тока замыкания также имеет место обрыв связи фазы с землей. Так как наша задача имеет предельный характер для оценки возможности появления феррорезонансных явлений, то в качестве предельного случая стоит рассмотреть погасание дуги при переходе через нуль высокочастотной составляющей тока замыкания. В момент прохождения тока через нуль в месте

замыкания в дуговом промежутке преобладает процесс деионизации, который приводит к восстановлению электрической прочности. Скорость этого процесса определяется конкретными условиями охлаждения, то есть газовой средой, дутьем и размерами дугового промежутка [7]. Моделирование этого процесса крайне затруднено из-за большого многообразия условий горения дуги. В связи с этим, в технике высоких напряжений при выполнении расчетов принято повторный пробой производить при достижении напряжения на поврежденной фазе максимального значения [8].

Опасные феррорезонансные явления в сетях средних классов напряжений могут возникнуть в случае, если по каким-либо причинам напряжение на трансформаторе напряжения (ТН) электромагнитного типа превышает номинальное более чем на 25...30%. Такие условия часто возникают в процессе ОДЗ уже при первом зажигании дуги.

Эквивалентная простейшая схема, позволяющая пояснить физику феррорезонансных колебаний, обусловленных насыщением стали магнитопровода трансформатора на рисунке 1.

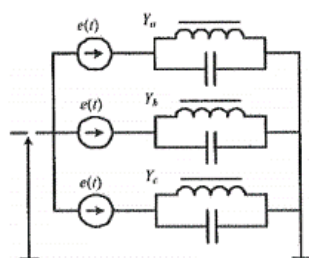


Рис. 1. – Схема для пояснения физики возникновения феррорезонансных явлений [Scheme for explaining the physics of ferroresonance phenomena appearance]

В нормальном эксплуатационном режиме индуктивность намагничивания ТН представляет собой большую величину, и результирующая проводимость фазы носит емкостный характер. Если в каком-либо переходном режиме повышается напряжение на одной фазе, то проводимость этой фазы может носить уже индуктивный характер, и, поскольку за счет изолированной нейтрали все фазы связаны между собой, может возникнуть явление, которое иногда называют «неустойчивостью нейтрали» [9].

При этом процессы, происходящие в отдельных фазах, оказываются взаимосвязанными, что приводит к возникновению колебаний широкого спектра частот: 3ω , 2ω , $\omega/2$, $\omega/3$. Именно субгармонические колебания и обуславливают появление сверхтоков в обмотках высокого напряжения ТН. Так для трансформаторов напряжения типа ЗНОЛ.06-24 опасным являются длительные токи, превышающие 0,045 А. Допустимый ток для ТН типа ТЈС7 оценивается в интервале 0,06 А. Развитие ультрагармонических колебаний приводит к появлению перенапряжений.

При возникновении устойчивого феррорезонансного процесса может возникнуть броски тока намагничивания большой величины, способные разрушить обмотку. Согласно [10] в таблице 1 приведены токи плавления проводов различного диаметра из разных материалов.

В цепях с трансформаторами напряжения возможность возникновения и существования феррорезонансного процесса определяется выполнением трех условий.

Первое условие: величина эквивалентной емкости сети ($C_{\text{экв}}$) должна находиться в пределах определяемых пределами изменения индуктивности трансформатора напряжения, т.е.

$$\frac{1}{\omega^2 \cdot L_{\text{xx}}} \leq C_{\text{экв}} \leq \frac{1}{\omega^2 \cdot L_s} \quad (1)$$

где L_{xx} – индуктивность холостого хода xx , Гн;

L_s – индуктивность насыщения, Гн;
 ω – угловая частота напряжения сети, 1/с

Таблица 1. – Зависимость величины тока плавления от диаметра провода [Dependence of melting current on the wire diameter]

Ток, А	Диаметр провода, мм			
	Медь	Алюминий	Сталь	Олово
1	0,039	0,066	0,132	0,183
2	0,069	0,104	0,189	0,285
3	0,107	0,137	0,245	0,38
5	0,18	0,193	0,346	0,53
7	0,203	0,25	0,45	0,66
10	0,250	0,305	0,55	0,85
15	0,32	0,4	0,72	1,02
20	0,39	0,485	0,87	1,33
25	0,46	0,56	1	1,56
30	0,52	0,64	1,15	1,77
35	0,58	0,7	1,26	1,95
40	0,63	0,77	1,38	2,14
45	0,68	0,83	1,5	2,3
50	0,73	0,89	1,6	2,45
60	0,82	1	1,8	2,8
70	0,91	1,1	2	3,1
80	1	1,22	2,2	3,4
90	1,08	1,32	2,38	3,65
100	1,15	1,42	2,55	3,9

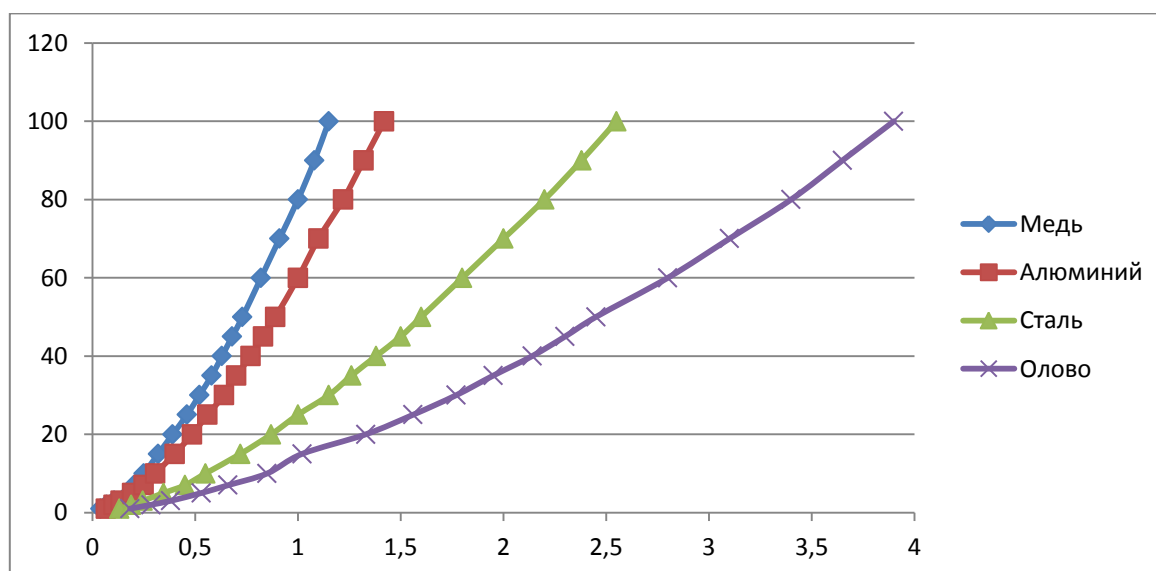


Рис. 2. – Зависимость величины тока плавления от диаметра провода [Dependence of the melting current on the wire diameter]

Возбуждение ФРП связано с нелинейным изменением индуктивности ТН. Причем, начавшееся плавное изменение индуктивности происходит до тех пор, пока не возникнут условия резонанса $\omega \cdot L = 1/\omega \cdot C$ (такие как в контуре с линейной

индуктивностью), что приводит к установившемуся ФРП. Это очевидно т.к. ФРП с одним и тем же ТН возникает в схемах с различной эквивалентной емкостью [11].

Рассматривая процессы намагничивания стального сердечника ТН, можно определить пределы изменения индуктивности ТН: максимальное значение индуктивности равно X_X и может быть вычислено с учетом того, что относительная магнитная проницаемость имеет при этом максимальное значение и равна $\mu_{max} = 25000$, а максимальное значение индуктивности ТН принимает при достижении насыщения, после чего остается неизменной и равной индуктивности обмотки ТН без магнитопровода, т.к. относительная магнитная проницаемость стали при насыщении близка к единице.

Поток магнитопровода составляет всего $(1,3 - 1,4) \cdot \Psi_H$. Если бы этот поток равномерно распределился по всему магнитопроводу, то он бы насытил его полностью, и динамическая магнитная проницаемость упала бы до единицы. В действительности поток распределен неравномерно, и отдельные части магнитопровода остаются неполностью насыщенными. Поэтому средняя магнитная проницаемость стали несколько возрастает, что увеличивает индуктивность насыщения в 1,3–1,4 раза.

Второе условие: для возбуждения ФРП в контуре с параметрами, отвечающими первому условию, необходимо событие, приводящее к изменению индуктивности ТН. Таким событием в сети с изолированной нейтралью является отключение дугового металлического замыкания на землю, при котором напряжение на ТН скачком изменяется от U_L до U_ϕ .

При скачкообразном изменении напряжения на ТН в его магнитопроводе сохраняется остаточный поток, соответствующий величине напряжения до скачка ($\Psi_{ост}$), на который накладывается переменный поток от напряжения, установившегося после скачка ($\Psi_{уст}$). После отключения замыкания в момент напряжения на фазе А после переходного процесса устанавливается практически равным U_L ($1,71 \cdot U_\phi$), а поток той же фазы ТН возрастает от величины Ψ_L до отключения замыкания до величины $(\Psi_L + \Psi_\phi)$ после отключения замыкания. Ток первичной обмотки ТН резко возрастает, что соответствует режиму насыщения ТН [12].

ФРП возбуждается в контуре с резонансными параметрами после скачка напряжения в том случае, если суммарный поток в магнитопроводе ТН окажется больше потока начального насыщения магнитопровода ($\Psi_{нач.нас}$), так как это вызовет насыщение магнитопровода и плавное изменение индуктивности ТН:

$$\Psi_{ост} + \Psi_{уст} \geq \Psi_{нач.нас}$$

Третье условие: величина энергии, поступающей в феррорезонансный контур при каждом изменении параметра (индуктивности ТН), должна быть больше величины потерь в нем.

ФРП относится к параметрическим процессам, так как возникает, когда создаются условия (первое и второе) для изменения одного из параметров контура – индуктивности ТН, которая изменяется скачкообразно от индуктивности холостого хода L_{xx} до индуктивности насыщения L_s . Параметрический резонанс изучен достаточно полно. Известно, что при скачкообразном увеличении индуктивности энергия контура возрастает на величину $0,5 \cdot (L_{xx} - L_s)$ уменьшении индуктивности не вызывает изменение запаса электромагнитной энергии контура, так как на это изменение не затрачивается работа.

Частота свободных колебаний тока в параметрическом контуре равна:

$$\gamma = \sqrt{(1/C \cdot L)^2 - (R/2 \cdot L)^2} \quad (2)$$

Эта собственная частота определяется исключительно параметрами L , C и R контура. Если активное сопротивление мало по сравнению с волновыми сопротивлениями контура, то с достаточной точностью:

$$\gamma = \sqrt{(1/C \cdot L)^2} \quad (3)$$

В этом контуре собственная частота зависит только от индуктивности и емкости контура и совпадает с его резонансной частотой.

По мере увеличения активного сопротивления возрастает относительное значение второго члена под корнем в выражении (2) и собственная частота уменьшается, то есть колебания свободного тока становятся более медленным [13]. Когда активное сопротивление достигает значения:

$$R = 2 \cdot \sqrt{L/C} \quad (4)$$

собственная частота обращается в нуль, колебания превращаются и свободный ток убывает по аperiодическому закону, и в этом случае возникновение резонансных колебаний невозможно. Внесение в контур затухания, эквивалентного затухания, вносимому критическим сопротивлением, предотвращает возникновения ФРП. Величина резистора, необходимого для подавления ФРП, может быть вычислена по (4), однако наличие нелинейной зависимости $L=f(i)$ усложняет расчеты и требует применения ЭВМ [14–16].

Упростим (4), используя тот факт, что при ФРП сохраняется действительным равенства индуктивной и емкостной проводимостей контура, как и при резонансе в линейном контуре, что позволяет выразить индуктивность ТН через эквивалентную емкость контура, которая остается постоянной, то есть не зависит от величины напряжения или тока, как это имеет место для индуктивности ТН. Тогда

$$L = 1/\omega^2 \cdot C, a L = 2/\omega \cdot C_{э\kappa\theta} \quad (5)$$

Определенное значение критического сопротивления позволяет оценить значение потерь, необходимых для подавления ФРП, через затухание в контуре или через значение активной составляющей тока замыкания на «землю».

Необходимая величина затухания может быть внесена подключением резистора в первичную цепь. Так в сети с изолированной нейтралью наиболее эффективно подключение резистора к нейтрали сети, например, к нейтрали силового питающего трансформатора [15].

Определение оптимальных параметров разрядного устройства, способного защитить аппараты сети от воздействия неблагоприятных факторов, сопровождающих практически все изученные виды повреждений с однофазным замыканием на «землю», необходимо производить, исходя из следующих требований:

1. Разрядное устройство должно длительно выдерживать рабочее напряжение сети и отвечать требованиям ПУЭ.

2. Подключение разрядного устройства лишь в минимальной степени должно изменить режим нейтрали сети, то есть не должно сколько-нибудь существенно увеличивать ток замыкания на «землю».

3. Разряд емкости сети через это разрядное устройство должен происходить за время меньше половины периода промышленной частоты ($\tau \leq 0,01$ с).

4. Затухание, вносимое эквивалентным сопротивлением разрядного устройства в контур, образуемый сетью, должно быть не меньше затухания вносимого сопротивлением, равным критическим сопротивлению для данного контура.

Как было показано выше, кроме подавления ФРП такой резистор предотвращает и возникновение дуговых перенапряжений. Этот резистор успевает разрядить сеть и при наиболее неблагоприятном режиме дугового замыкания на «землю», когда дуга

замыкается один раз в период и является фактически выпрямителем, что приводит к перевозбуждению индуктивных элементов сети постоянным током.

Дополнительным положительным фактором заземления нейтрали через активное сопротивление является улучшение условий работы релейной защиты от замыканий на «землю» за счет появления стабильной активной составляющей в токе замыкания на «землю» [17–18]. Такой способ защиты сетей с изолированной нейтралью рекомендован симпозиумом, кроме того похожее техническое решение применяется для защиты сетей СН тепловых и атомных станций.

В сетях собственных нужд электростанций применяются напряжения 6-10 кВ, и применительно к схемам сетей данного напряжения, при выборе режима заземления нейтрали сети, необходимо использовать градацию электрических сетей по двум наиболее важным признакам – величине тока замыкания на землю и наличию вращающихся машин.

При токе замыкания на землю более 20 А в сетях 6 и 10 кВ с комбинированным питанием от энергосистем и собственных нужд электростанций при действии релейной защиты на отключение присоединения с ОЗЗ используется резистор в нейтрали сети с ограниченным временем протекания тока. Ток резистора изменяется от десятков до сотен ампер и зависит от типа защит от ОЗЗ.

Наличие вращающихся машин является принципиальным фактором, поскольку предполагает обязательное отключение присоединения с двигателем (или генератором), на котором произошло ОЗЗ, и накладывает более жесткие требования к допустимым величинам перенапряжений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алексеев, В.Г. и др.* Феррорезонанс в сетях 6-10 кВ [Текст] / В.Г. Алексеев, М.Х. Зихерман // Электрические станции. – 1978. – №1. – С. 63–65.
2. *Петров, О.А.* Смещение нейтрали при пофазных отключениях и обрывах фаз в компенсированной сети [Текст] / О.А. Петров // Электрические станции. – 1972. – №9. – С. 57–61.
3. *Халилов, Ф.Х.* Еще раз о дуговых перенапряжениях в распределительных сетях 6-35 кВ. [Текст] / Ф.Х. Халилов // Промышленная энергетика. – 1985. – №11. – С.37–41.
4. *Эль-Хатиб Адна Ибрагим.* Феррорезонансные процессы в трансформаторах напряжения систем электроснабжения и способы их предотвращения [Текст] / Эль-Хатиб Адна Ибрагим : дис. ... канд. техн. наук. – Донецк: Дон. политех. ин-т, 1992. – 132 с.
5. *Базуткин, В.В. и др.* Техника высоких напряжений: Изоляция и перенапряжения в электрических системах: Учебник для вузов [Текст] / В.В. Базуткин, В.П. Ларионов, Ю.С. Пинталь; Под общей редакцией В.П. Ларионова. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Электроатомиздат, 1986. – 464 с.: ил.
6. *Лихачев, Ф.А.* Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов [Текст] / Ф.А. Лихачев. – М.: Энергия, 1971. – 152 с.
7. *Гиндуллина, Ф.А. и др.* Перенапряжения в сети 6-35 кВ [Текст] / Ф.А. Гиндуллина, В.Г. Гольдштейн, А.А. Дузользон, Ф.Х. Халилов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 192 с.: ил.
8. *Сирота, И.М. и др.* Защита от замыканий на землю на стороне генераторного напряжения блоков генератор-трансформатор, охватывающая нейтраль генератора [Текст] / И.М. Сирота, А.Е. Богаченко. – Киев: Изд-во ИЭД АН УССР, 1972. – 21 с.
9. *Сивокобыленко, В.Ф. и др.* Переходные процессы в системах электроснабжения собственных нужд электростанций: Учеб. пособие / В.Ф. Сивокобыленко, В.К. Лебедев. – Донецк: РОА ДонНТУ, 2002. – 136 с.
10. *Сиротинский, Л.И.* Техника высоких напряжений. Волновые процессы и внутренние перенапряжения в электрических системах [Текст] / Л.И. Сиротинский. – М.: Госэнергоиздат, 1959.
11. *Халилов, Ф.Х. и др.* Защита сетей 6-35 кВ от перенапряжений [Текст] / Ф.Х. Халилов, Г.А. Евдокунин, В.С. Поляков и др. Под ред. Ф.Х. Халилова, Г.А. Евдокунина, А.И. Таджикибаева. – СПб.: Энергоатомиздат, 2002.
12. *Базылев, Б.И. и др.* Дугогасящие реакторы с автоматической компенсацией емкостного тока замыкания на землю [Текст] / Б.И. Базылев, А.М. Брянцев, А.Г. Долгополов и др. – СПб.: Изд. ПЭИПК, 1999.

13. *Беляков, Н.Н.* Исследование перенапряжений при дуговых замыканиях на землю в сетях 6 и 10 кВ с изолированной нейтралью [Текст] / Н.Н. Беляков // *Электричество*. – 1957. – №5. – С. 31–36.
14. *Сивокобыленко, В.Ф. и др.* Режимы работы нейтрали распределительных сетей 6–10 кВ В.Ф. Сивокобыленко, М.П. Дергилёв // *Сб. научных трудов ДонГТУ. Серия: Электротехника и энергетика*, Вып. 67. – Донецк: ДонГТУ, 2003. – С. 49–58.
15. *Сивокобыленко, В.Ф. и др.* Анализ процессов дуговых замыканий на землю в сетях собственных нужд ТЭС и АЭС В.Ф. [Текст] / В.Ф. Сивокобыленко, В.К. Лебедев, Махинда Сильва // *Сб. научных трудов ДонГТУ. Серия: Электротехника и энергетика*, Вып. 17. – Донецк: ДонГТУ, 2000. – С. 129–133.
16. *Дергилев, М.П. и др.* Неснижаемые кратности перенапряжений в сети 6–35 кВ с резистивным заземлением нейтрали [Текст] / М.П. Дергилев, В.К. Обабков // *Наука, техника, бизнес в энергетике* – 2002. – №5. – С. 10–14.
17. *Калантаров, П.Л. и др.* Расчет индуктивностей [Текст] / П.Л. Калантаров, Л.А. Цейтлин: Справочная книга. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1986. – 488 с: ил.
18. *Неклепаев, Б.Н. и др.* Электрическая часть электростанций и подстанций [Текст] / Б.Н. Неклепаев, И.П. Крючков: Справочные материалы для курсового и дипломного проектирования. – Учеб. пособие для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 608 с.

REFERENCES

- [1] Alekseev V.G., Ziherman M.H. Ferrozonans v setjah 6-10 kV [Ferroresonance in 6-10 kV Networks]. Elektricheskie stancii [Electric Stations], 1978, №1, pp. 63–65. (in Russian)
- [2] Petrov O.A. Smeshhenie nejtrali pri pofaznyh otkljuchenijah i obryvah faz v kompensirovannoj seti [The Neutral Bias for Phase-Out Tripping and Phase Failure in Compensated Network]. Elektricheskie stancii [Electric Stations], 1972, №9, pp. 57–61. (in Russian)
- [3] Halilov F.H. Eshhe raz o dugovyh perenaprjazhenijah v raspredelitelnyh setjah 6-35 kV [Once Again about Arc Overvoltages in Distribution Networks 6-35 kV.]. Promyshlennaja energetika [Industrial Power Engineering], 1985, №11. pp. 37–41. (in Russian)
- [4] Jel-Hatib Adna Ibragim. Ferrozonansnye processy v transformatorah naprjazhenija sistem elektrosnabzhenija i sposoby ih predotvrashhenija [Ferroresonance Processes in Voltage Transformers of Power Supply Systems and Ways to Prevent Them]. Dissertacija na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tehniceskix nauk [Theses of PhD in Engineering]. Donetsk. Pub. Donskoj politehnicheskij institute [Don Polytechnic Institute], 1992, 132 p. (in Russian)
- [5] Bazutkin V.V., Larionov V.P., Pintal Ju.S. Tehnika vysokih naprjazhenij: Izoljacija i perenaprjazhenija v elektricheskix sistemah [High Voltage Technology: Isolation and Overvoltage in Electrical Systems]. M. Pub. Elektroatomizdat [Electroatomizdat], 1986, 464 p. (in Russian)
- [6] Lihachev F.A. Zamykanija na zemlju v setjah s izolirovannoj nejtralju i s kompensaciej emkostnyh tokov [Ground Faults in Networks with Isolated Neutral and with Compensation of Capacitive Currents]. M. Pub. Energija [Energy], 1971, 152 p. (in Russian)
- [7] Gindullina F.A., Goldshtejn V.G., Duzolzon A.A., Halilov F.H. Perenaprjazhenija v seti 6-35 kV [Overvoltages in 6-35 kV Network]. M. Pub. Energoatomizdat [Electroatomizdat], 1989, 192 p. (in Russian)
- [8] Sirota I.M., Bogachenko A.E. Zashhita ot zamykanij na zemlju na storone generatornogo naprjazhenija blokov generator-transformator, ohvatyvajushhaja nejtral generator [Earth-Fault Protection on the Generator Voltage Side of Generator-Transformer Blocks Covering the Generator's Neutral]. Kiev. Pub. IED AN USSR [IED Academy of Sciences of the Ukrainian SSR], 1972, 21 p. (in Russian)
- [9] Sivokobylenko V.F., Lebedev V.K.. Perehodnye processy v sistemah jelektrosnabzhenija sobstvennyh nuzhd elektrostancij [Transient Processes in Power Supply Systems of Power Plants Own Needs]. Donetsk. Pub. ROA DonNTU [ROA DonNTU], 2002, 136 p. (in Russian)
- [10] Sirotinskij L.I. Tehnika vysokih naprjazhenij. Volnovye processy i vnutrennie perenaprjazhenija v jelektricheskix sistemah [Technique of High Stresses. Wave Processes and Internal Overvoltages in Electrical Systems]. M. Pub. Gosenergoizdat [Gosenergoizdat], 1959. (in Russian)
- [11] Halilov F.H., Evdokunin G.A., Poljakov V.S. etc. Zashhita setej 6-35 kV ot perenaprjazhenij [Protection of 6-35 kV Overvoltage Networks]. Sankt-Peterburg. Pub. Energoatomizdat [Electroatomizdat], 2002. (in Russian)
- [12] Bazylev B.I., Brjancev A.M., Dolgoplov A.G. etc. Dugogasjashhie reaktory s avtomaticheskoj kompensaciej emkostnogo toka zamykanija na zemlju [Arc Suppression Reactors with Automatic Compensation of the Capacitive Earth Fault Current]. Sankt-Peterburg. Pub. PEIPK [PEIC], 1999. (in Russian)
- [13] Beljakov N.N. Issledovanie perenaprjazhenij pri dugovyh zamykanija na zemlju v setjah 6 i 10 kV s izolirovannoj nejtralju [Survey of Overvoltages with Arc Faults on Ground in 6 and 10 kV Networks with Isolated Neutral]. Elektrichestvo [Electricity], 1957, №5, pp. 31–36. (in Russian)

- [14] Sivokobylenko V.F., Dergil'ov M.P. Rezhimy raboty nejtrali raspredelitel'nyh setej 6-10 kV [Operating Modes of Neutral Distribution Networks 6-10 kV]. Sbornik nauchnyh trudov DonGTU. Serija: elektrotehnika i energetika [Collection of Scientific Works of DonSTU. Series: Electrical Engineering and Power Engineering], Issue 67. Donetsk. Pub. DonNTU [DonNTU], 2003, pp. 49–58. (in Russian)
- [15] Sivokobylenko V.F., Lebedev V.K., Mahinda Silva. Analiz processov dugovyh замыkanij na zemlju v setjah sobstvennyh nuzhd TES i AES [Analysis of the Processes of Arc Faults on the Ground in the Auxiliary Networks of TPPs and NPPs]. Sbornik nauchnyh trudov DonGTU. Serija: Elektrotehnika i energetika [Collection of Scientific Works of DonSTU. Series: Electrical Engineering and Power Engineering], Issue 17. Doneck. Pub. DonGTU [DonNTU], 2000, pp. 129–133. (in Russian)
- [16] Dergilev M.P., Obabkov V.K. Nesnizhaemye kratnosti perenaprjazhenij v seti 6-35 kV s rezistivnym zazemleniem nejtrali [Non-Reducible Multiplicities of Overvoltages in the 6-35 kV Network with Resistive Neutral Grounding of the Neutral]. Nauka, tehnika, biznes v energetike [Science, Technology, Business in the Energy Sector], 2002, №5, pp. 10–14. (in Russian)
- [17] Kalantarov P.L., Cejtin L.A. Raschet induktivnostej [Calculation of Inductances]. Leningrad. Pub. Energoatomizdat [Electroatomizdat], 1986, 488 p. (in Russian)
- [18] Neklepaev B.N., Krjuchkov I.P. Jelekticheseskaja chast jelektrostantsij i podstantsij: Spravochnye materialy dlja kursovogo i diplomnogo proektirovanija [Electric Part of Power Plants and Substations: Reference materials for course and diploma design]. M. Pub. Energoatomizdat [Electroatomizdat], 1989, 608 p. (in Russian)

Ferrorezonans Emergency in the 24 kV Generator Voltage Circuits of NPP Units

S.A. Baran^{*}, V.V. Nechitajlov^{}, V.V. Krasnokutskij^{***}**

*Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University "MEPhI",
Lenin St., 73/94, Volgodonsk, Rostov region, Russia 347360*

^{*} ORCID: 0000-0002-3232-4072

WoS Researcher ID: I-7933-2018

e-mail: bastr@rambler.ru

^{**} ORCID: 0000-0002-6795-2458

WoS Researcher ID: J-3646-2018

e-mail: VITkafAE@mephi.ru

^{***} ORCID: 0000-0002-4498-2996

WoS Researcher ID: I-4045-2018

e-mail: leronil@mail.ru

Abstract – The paper analyzes the causes leading to false protection and shutdown of NPP units as well as damage to the measuring voltage transformers installed in the generator voltage network.

The reasons that lead to the appearance of ferroresonance phenomena in the network and the way to eliminate them are considered.

A number of emergency shutdowns of power units from the network by the action of earth fault protection are observed in the network of NPP generator voltage. According to the emergency situation investigations some of them turned out to be false. The cause of false accidents is often the appearance of ferroresonance phenomena in the network caused by load switching, short-time arcing and a number of other reasons.

When a ferroresonance occurs it is well known that in many cases it is possible to have high multiplicities of overvoltages, dangerous for voltage transformers and for interturn isolation of the generator.

This article analyzes the possibility of manifesting ferroresonance phenomena in the generator voltage network of NPP power units under various emergency conditions.

Keywords: ferroresonance, generator voltage, isolated neutral, voltage transformer, overvoltage.