

---

---

## СЕКЦИЯ 2

---

---

# ЭКСПЛУАТАЦИЯ ЭНЕРГОБЛОКОВ АЭС

УДК 621.316

### ПРИЧИНЫ ПРОТЕКАНИЯ ФЕРРОРЕЗОНАНСНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЦЕПЯХ ГЕНЕРАТОРНОГО НАПРЯЖЕНИЯ 24 КВ И СПОСОБЫ ИХ ЛИКВИДАЦИИ

**С.А. Баран, В.В. Нечитайлов, В.В. Краснокутский**

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

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  $L_{\text{xx}}$  – индуктивность холостого хода хх, Гн;  
 $L_s$  – индуктивность насыщения, Гн;  
 $\omega$  – угловая частота напряжения сети, 1/с

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.

Рассматривая процессы намагничивания стального сердечника ТН, можно определить пределы изменения индуктивности ТН: максимальное значение индуктивности равно  $X_{\text{H}}$  и может быть вычислено с учетом того, что относительная магнитная проницаемость имеет при этом максимальное значение и равна  $\mu_{\text{max}} = 25000$ , 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  $(1,3 - 1,4) \cdot \Psi_{\text{H}}$ . 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  $U_{\text{л}}$  до  $U_{\text{ф}}$ .

При скачкообразном изменении напряжения на ТН в его магнитопроводе сохраняется остаточный поток, соответствующий величине напряжения до скачка ( $\Psi_{\text{ост}}$ ), на который накладывается переменный поток от напряжения, установившегося после скачка ( $\Psi_{\text{уст}}$ ).

После отключения замыкания в момент напряжения на фазе А после переходного процесса устанавливается практически равным  $U_{л} (1,71 \cdot U_{\phi})$ , а поток той же фазы ТН возрастает от величины  $\Psi_{л}$  до отключения замыкания до величины  $(\Psi_{л} + \Psi_{\phi})$  после отключения замыкания. Ток первичной обмотки ТН резко возрастает, что соответствует режиму насыщения ТН.

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:

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

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 становится более медленным. 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.

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

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

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.

Источником питания в рассматриваемой сети является генератор. Индуктивность рассеяния  $L_p$  и активное сопротивление  $R_r$  источника питания определяются по номинальным параметрам. Согласно [12] номинальное активное сопротивление обмотки генератора составляет 0,001 1 Ом. При дуговом замыкании по фазам источника протекают свободные составляющие токов зарядных контуров, которые имеют большую частоту (несколько килогерц), поэтому согласно [13] активное сопротивление источника следует увеличить в 2-2,5 раза. Для моделирование переходных процессов сети реактивное сопротивление генератора рассчитывалось исходя из сверхпереходного сопротивления, которое составляет 0,324 о.е.

Генератор моделировался посредством готовых блоков из библиотеки элементов программы АТР ЕМТР, для которых задавались активные сопротивления и индуктивности обмоток. Также для рассматриваемых процессов большую роль играют паразитные емкости на землю. Согласно формуле, приведенной в [14], емкость для фазы обмотки статора генератора может быть рассчитана:

$$C_2 = \frac{k \cdot S}{1,2 \cdot \sqrt{U_{ном} \cdot (1 + 0,08 \cdot U_{ном})}}, \quad (6)$$

где:  $k=0,0187$  при 15-20°C;

$U_{ном}$  – номинальное напряжение;

$S$  – номинальная мощность.

$$C_2 = \frac{0,0187 \cdot 1100}{1,2 \cdot \sqrt{24 \cdot (1 + 0,08 \cdot 24)}} = 2,04 \text{ мкФ}$$

Индуктивность обмотки трансформатора определялась следующим образом:

$$L_{обм} = \frac{U_k}{100} \cdot \frac{U_{ном.обм.}^2}{S_{ном.обм.} \cdot \omega} \quad (7)$$

где:  $U_k$  – напряжение короткого замыкания;

$U_{ном.обм.}$  – номинальное напряжение;

$\omega=100\pi$ ;

$S_{ном.обм.}$  – номинальная мощность обмотки трансформатора.

$$R_{обм} = \Delta P_k \cdot \frac{U_{ном}^2}{S_{ном}^2}, \quad (8)$$

где:  $P_k$  – потери короткого замыкания трансформатора.

Для блочного трансформатора ТЦ-630000/500:

$$U_{кв} = U_{кн} = U_k/2$$

$$U_{кв} = U_{кн} = \frac{14}{2} = 7\%$$

$$S_{ном.обм.} = S_{ном}/3$$

$$S_{ном.обм.} = \frac{630}{3} = 210$$

Тогда индуктивность и активное сопротивление обмоток:

$$L_{обмв} = \frac{7}{100} \cdot \frac{303,1^2}{210 \cdot 314} = 0,0974 \text{ Гн}$$

$$L_{обмн} = \frac{7}{100} \cdot \frac{24^2}{210 \cdot 314} = 6,115 \cdot 10^{-4} \text{ Гн}$$

$$R_{обмв} = 0,605 \cdot \frac{303,1^2}{210^2} = 1,26 \text{ Ом},$$

$$R_{обмн} = 0,605 \cdot \frac{24^2}{210^2} = 0,0079 \text{ Ом},$$

Для трансформатора собственных нужд ТРДНС 63000/24/6,3

$$L_{обмв} = \frac{0,01(U_{квв} - 0,25U_{кнн})}{100} \cdot \frac{U_{ном.обм.}^2}{S_{ном.обм.}} \quad (9)$$

$$L_{обмн} = \frac{0,05U_{кнн}}{100} \cdot \frac{U_{ном.обм.}^2}{S_{ном.обм.}} \quad (10)$$

Активное сопротивление обмотки трансформатора рассчитывается по формуле (3).

$$L_{обмв} = \frac{0,01(U_{квв} - 0,25U_{кнн})}{100} \cdot \frac{U_{ном.обм.}^2}{S_{ном.обм.}}$$

$$L_{обмн} = \frac{0,05U_{кнн}}{100} \cdot \frac{U_{ном.обм.}^2}{S_{ном.обм.}}$$

Для блочного трансформатора ТЦ-630000/500:

$$S_{ном.обм.} = S_{ном}/3$$

$$S_{ном.обм.} = \frac{63}{3} = 21$$

Тогда индуктивность и активное сопротивление обмоток:

$$L_{обмв} = \frac{0,01(12,7 - 0,25 \cdot 40)}{100} \cdot \frac{35^2}{21 \cdot 314} = 1,18 \cdot 10^{-5} \text{ Гн}$$

$$L_{обмн} = \frac{0,05 \cdot 40}{100} \cdot \frac{6,3^2}{21 \cdot 314} = 6 \cdot 10^{-6}$$

$$R_{обмв} = 0,605 \cdot \frac{35^2}{21^2} = 0,058 \text{ Ом},$$

$$R_{обмн} = 0,605 \cdot \frac{6,3^2}{21^2} = 0,0011 \text{ Ом},$$

Для расчета входной емкости трансформаторов были взяты формулы:

$$\tilde{N}_{\dot{a}\dot{o}} = \frac{\tilde{N}_2 \tilde{N}_{12}}{\tilde{N}_2 + \tilde{N}_{12}}$$

$$\tilde{N}_1 = 0,07 \frac{S_{\dot{m}}^{0,35}}{U_{\dot{a}}^{0,175}}$$

$$\tilde{N}_2 = 1,3 \frac{\sqrt{S}}{\tilde{N}_2 + 13 + 0,2\sqrt{S}}$$

$$\tilde{N}_1 = \frac{\sqrt{S}}{U_{\dot{a}}}$$

$$\tilde{N}_1 = 0,07 \frac{630^{0,35}}{535^{0,175}} = 0,223$$

$$\tilde{N}_2 = 1,3 \frac{\sqrt{630}}{24 + 13 + 0,2\sqrt{630}} = 0,776$$

$$\tilde{N}_1 = \frac{\sqrt{S}}{U_{\dot{a}}}$$

Эти граничные условия соответствуют для сети с одним ТН.

Ввиду отсутствия данных и схожести общих конструктивных соображений, примем для оценочного расчета, индуктивность намагничивания и холостого хода ЗНОЛ.06-24УЗ и ТЖ С7 равными.

При нахождении суммарной емкости сети близкой к данным значениям возможно возникновения устойчивых феррорезонансных явлений.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алексеев, В.Г.* Феррорезонанс в сетях 6-10 кВ [Текст] / В.Г. Алексеев, В.Х. Зихерман // Электрические станции. – 1978. – №1. – С. 63-65
2. *Петров, О.А.* Смещение нейтрали при пофазных отключениях и обрывах фаз в компенсированной сети. – Электрические станции. – 1972. – №9. – С. 557-561
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: дис. канд. техн. наук. [Текст] / Ибрагим Эль-Хатиб Адна. – Донецк: Дон. политех. ин-т, 1992. – 132 с.
5. *Базуткин, В.В.* 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. – Москва : Электроатомиздат, 1986. – 464 с.
6. *Лихачев, Ф.А.* Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов / Ф.А. Лихачев. – Москва : Энергия, 1971 – 152 с.
7. *Гиндуллина, Ф.А.* Перенапряжения в сети 6-35 Кв [Текст] / Ф.А. Гиндуллина, В.Г. Гольдштейн, А.А. Дузользон, Ф.Х. Халилов. – Москва : Энергоатомиздат, 1989. – 192 с.
8. Сирота И.М., Богаченко А.Е. Защита от замыканий на землю на стороне генераторного напряжения блоков генератор-трансформатор, охватывающая нейтраль генератора. / И.М. Сирота, А.Е. Богаченко. – Киев, Изд-во ИЭД АН УССР, 1972. – 21 с.

#### **Reasons for the Flowing of Ferrosnant Processes in the 24 kV Generator Voltage Chains and Methods of their Elimination**

**S.A. Baran<sup>1</sup>, V.V. Nechitailov<sup>2</sup>, V.V. Krasnokutskii<sup>3</sup>**

*Volgodonsk Engineering Technical Institute the Branch of National Research Nuclear University*

*«МЕРФИ»<sup>1</sup>bastr@rambler.ru*

*<sup>2</sup>VITIKaFA@mephi.ru*

*<sup>3</sup>leronil@mail.ru*

УДК 621.039

#### **ПЕРЕНОСНОЙ ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРОВ**

**Е.А. Абидова, А.Е. Дембицкий, В.И. Соловьёв, О.Ю. Пугачёва**

*НИИ АЭМ, Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Волгодонск, Ростовская обл.*

Представлены технические требования к переносному программно-техническому комплексу (ППТК), который предназначен для диагностирования дизель-генераторного оборудования безразборным способом в помещении дизель-генераторной установки АЭС (РДЭС). Описываются структура и информационные функции (ИФ) ППТК.