

УДК 621.311

Ю. Л. САЕНКО, д-р. техн. наук, профессор

А. С. ПОПОВ, аспирант

Приазовский государственный технический университет, г. Мариуполь

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГРАНИЦ СУЩЕСТВОВАНИЯ ФЕРРОРЕЗОНАНСА В СЕТИ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ ТРАНСФОРМАТОРАМИ НАПРЯЖЕНИЯ ТИПА НТМИ-6-66 НА ОСНОВЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

*В статье приведены результаты исследования феррорезонансных процессов в сети 6 кВ с изолированной нейтралью и электромагнитными трансформаторами напряжения типа НТМИ-6-66. Определены границы существования устойчивого феррорезонанса. Оценена эффективность защитного действия резистора в обмотке разомкнутого треугольника в борьбе с феррорезонансом.*

*У статті наведено результати дослідження феррорезонансних процесів у мережі 6 кВ з ізольованою нейтраллю та електромагнітними трансформаторами напруги типу НТМІ-6-66. Визначено межі існування стійкого феррорезонансу. Оцінено ефективність захисної дії резистора в обмотці розімкнутого трикутника у боротьбі з феррорезонансом.*

### Введение

Характерной особенностью работы сетей с изолированной нейтралью является повышенная аварийность измерительных трансформаторов напряжения контроля изоляции (ТНКИ). Имеются сети, которые из-за регулярных повреждений ТН длительно эксплуатируются без устройств сигнализации о замыкании на землю, что недопустимо по условиям техники безопасности. В результате трансформаторы напряжения (ТН) являются самым ненадежным оборудованием в сетях 6-10 кВ [1]. Об актуальности проблемы исследования причин повреждаемости ТН говорит статистика аварийности ТНКИ, рассмотренная на примере электрических сетей АК «Харьковоблэнерго», которая приведена в таблице [2]. Суммарное количество трансформаторов, установленных в данных сетях, равно 362. Добавим, что согласно статистике аварийности трансформаторов напряжения, ежегодно в Украине повреждается 7–10 % от всех установленных ТН.

Таблица

Повреждаемость трансформаторов напряжения в электрических сетях  
АК «Харьковоблэнерго»

Год	Количество поврежденных ТН	Год	Количество поврежденных ТН
1995	18	2000	37
1996	19	2001	69
1997	16	2002	49
1998	17	2003	49
1999	28	2004	28

**Цель настоящего исследования** заключается в определении границ существования феррорезонанса в сети с изолированной нейтралью и электромагнитными трансформаторами напряжения типа НТМИ-6-66, оценке эффективности мер подавления феррорезонанса, определении влияния резистивного заземления нейтрали на повреждаемость ТН, формулировке рекомендаций по подавлению феррорезонанса.

### Изложение основного материала

Известно, что повреждение данных ТН в значительной мере вызвано однофазными дуговыми замыканиями на землю (ОДЗ). Основной причиной повреждения ТН является воз-

никновение в сети феррорезонансных колебаний [3–4]. Условия возникновения феррорезонанса характерно для сетей со сравнительно малыми токами замыкания на землю (1–10 А). В то же время ситуация изменяется при наличии нескольких параллельных ТН. В такой ситуации вероятность феррорезонанса резко возрастает.

При исследовании различного рода переходных процессов особое внимание следует уделять созданию математической модели сети. Достоверность полученных результатов определяется соответствием между параметрами реальной сети и расчетной схемой замещения. Наибольший интерес представляют процессы при ОДЗ и его ликвидации. Расчетная схема для анализа переходных процессов, сопровождающих процесс ОДЗ, показана на рис. 1.

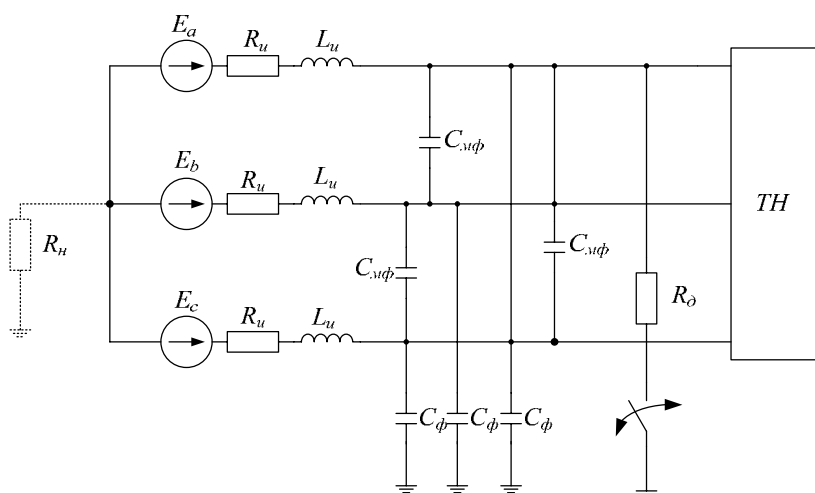


Рис. 1. Расчетная схема сети в режиме ОДЗ

На схеме замещения трансформатор, являющийся источником питания, представлен фазной индуктивностью рассеяния  $L_u$ , активным сопротивлением  $R_u$  и источником ЭДС  $E$ . Сеть представлена сосредоточенными фазной  $C_\phi$  и междуфазной  $C_{\mu\phi}$  емкостями.  $R_n$  – высокоомный резистор, предназначенный для снижения перенапряжений при дуговых замыканиях. В качестве исследуемой сети была принята сеть 6 кВ с параметрами  $L_u=0,3$  мГн,  $R_u=3,8$  мОм. Соотношение фазной и междуфазной емкости принято равным  $C_{\mu\phi}=1/3 C_\phi$  согласно [5].

При составлении схемы замещения использовались общепринятые допущения:

- междуфазные и фазные емкости сети приняты сосредоточенными;
- не учитывается нагрузка сети;
- не учитывается активная проводимость сети.

Трансформатор напряжения, введенный для учёта влияния феррорезонансных процессов в сети, представляет группу трех однофазных трансформаторов, заключенных в одном корпусе. Схема замещения ТН типа НТМИ представлена на рис. 2. В ней активное сопротивление  $R_l$  моделирует активное сопротивление первичной обмотки, активное сопротивление  $R_{cm}$  – активные потери в стали ТН, нелинейная индуктивность  $L_\mu$  – результирующую нелинейную индуктивность намагничивающего контура ТН, активное сопротивление  $R_\delta$  – балластное сопротивление, включаемое в обмотку разомкнутого треугольника для подавления феррорезонанса. Добавим, что  $R_l$  равно 1200 Ом,  $R_{cm}=2,4$  мОм, что эквивалентно потерям в стали 4,9 Вт при номинальном напряжении. В данной работе использована вебер-амперная характеристика, заимствованная из [6].

Замыкание фазы на землю имитируется активным сопротивлением, включаемым вместо фазной емкости. Моделирование процесса зажигания и погасания дуги осуществляется согласно теории Петерсена, в соответствии с которой зажигание происходит в момент максимума напряжения на «большой» фазе, а погасание – при первом переходе

через ноль тока высокочастотной составляющей. Математическая модель исследуемой сети реализована в пакете MATLAB.

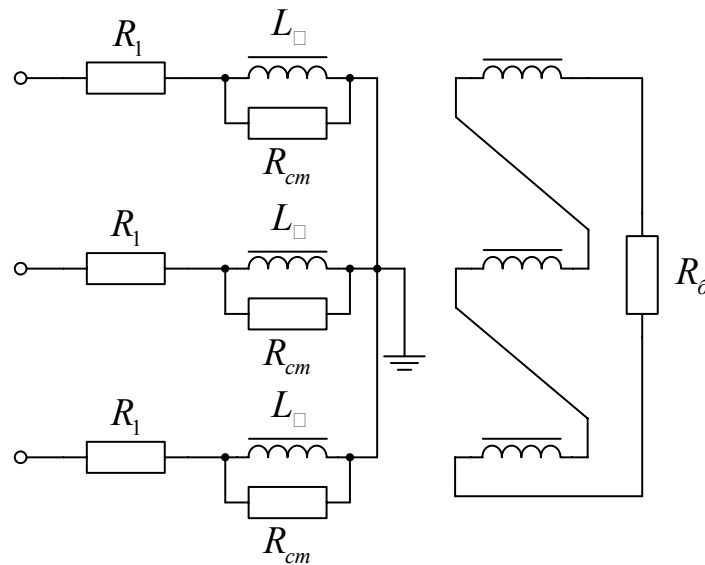


Рис. 2. Схема замещения ТН типа НТМИ

На рис. 3 приведены расчетные кривые фазных напряжений и токов в обмотке ВН трансформатора при глухом металлическом замыкании. Замыкание происходит в фазе А в момент времени 0,025 с. Из осциллограмм видно, что после замыкания напряжение неповрежденных фаз повышается до линейного, а напряжение «больной» фазы уменьшается до нуля. Следует отметить несинусоидальный характер тока в обмотке до момента замыкания. Это обусловлено нелинейностью стали на рабочем участке кривой намагничивания. Рабочая индукции ТН данного типа равна 0,92-0,95 Тл. Действующее значение тока в обмотке ВН при номинальном напряжении равно 4,2 мА, а при ОЗЗ увеличивается до 66,4 мА. Длительное протекание такого тока не представляет опасности для обмоток.

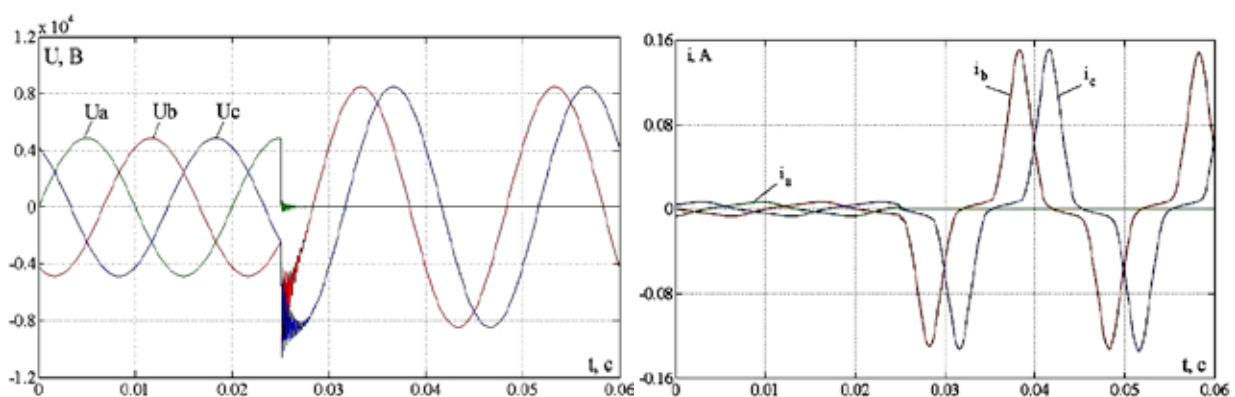


Рис. 3. Расчетные кривые фазных напряжений и токов в обмотке ВН трансформатора при глухом металлическом замыкании

На рис. 4 приведены расчетные кривые фазных напряжений и токов в обмотке ВН для случая устойчивого феррорезонанса, возникшего в результате кратковременного появления и самоустранения замыкания. В данном случае моделировалось однократное зажигание и погасание дуги в момент времени 0,035 с. При этом  $C_{\phi}=1$  мкФ. Токи в обмотке ВН трансформатора в этом режиме в несколько раз больше тока термической стойкости ТН. При

таком режиме повреждение ТН наступит в течение 5-7 минут [7]. При оценке термического воздействия на ТН от феррорезонанса существуют подходы, в которых определяются действующие значения тока для «пикового» участка или для всего расчетного участка [8]. При этом для данного случая имеем значения 1,38 А и 0,84 А соответственно.

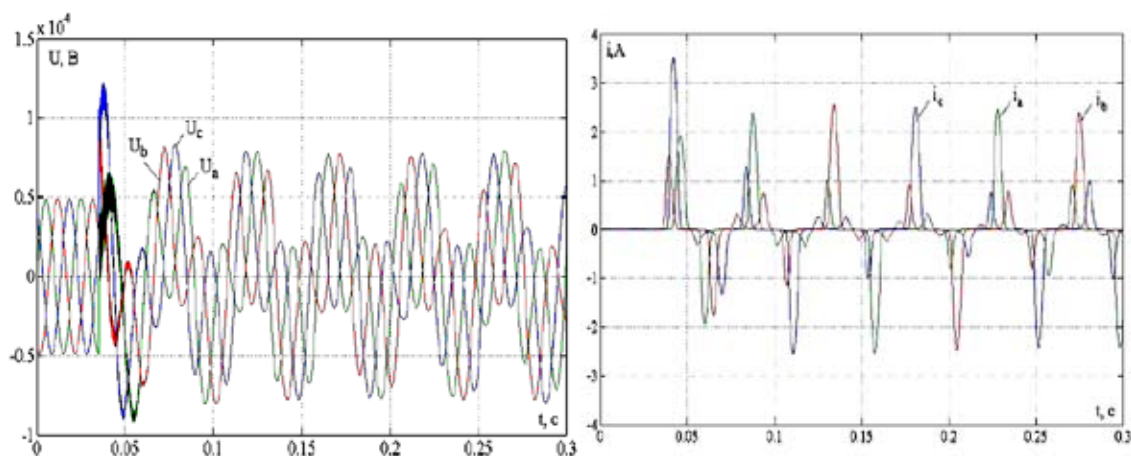


Рис. 4. Расчетные кривые фазных напряжений и токов в обмотке ВН трансформатора при устойчивом феррорезонансе,  $C_{\phi}=1$  мкФ

Феррорезонансные процессы опасны не только сверхтоками в обмотках ТНКИ, но и перенапряжениями, которые охватывают всю электрически связанную с местом повреждения сеть. В первый момент после ликвидации замыкания наблюдаются перенапряжения кратностью  $2,48 U_{\phi}$  (см. рис. 4). Это объясняется действием свободной составляющей. В установившемся режиме кратность перенапряжений равна  $1,63 U_{\phi}$ . Длительное воздействие даже такого незначительного перенапряжения может привести к повреждению ослабленной изоляции, поэтому этот режим следует считать опасным. В ходе расчетов были выявлены стационарные перенапряжения с максимальной кратностью  $2,2 U_{\phi}$ . Необходимо отметить, что время существования такого режима не ограничивается временем существования ОЗЗ, и он может продолжаться сколько угодно долго.

Характерной особенностью существования феррорезонанса является ложное срабатывание защит от замыканий на землю. При отключении или самоустранении замыкания в случае возникновения феррорезонанса на выводах обмотки разомкнутого треугольника, служащей для сигнализации о замыканиях на землю, будет напряжение, отличное от нуля. В результате оперативный персонал будет продолжать «видеть» замыкание. Случаи «ложной земли» достаточно распространены, однако в тоже время оперативный персонал подстанции без специальных средств не может отличить феррорезонанс от ОЗЗ. Особую опасность феррорезонанс представляет в сетях, защиты от замыканий в которых работают на отключение. Характерным примером такой сети является подстанция «Рудничная» Докучаевского ФДК, на которой среднее количество неселективных отключений равно 15 откл./мес. Детальное описание основных проблем и путей решения на данной подстанции описано в [9].

На рис. 5 приведена расчетная кривая напряжения на выводах обмотки разомкнутого треугольника при возникновении феррорезонанса в сети. В режиме феррорезонанса среднеквадратическое значение напряжения на выводах обмотки разомкнутого треугольника равно 71 В. Данного напряжения достаточно для срабатывания защиты от ОЗЗ, уставка которой зачастую равна 15 В. В тоже время срабатывание сигнализации при этом будет ошибочным.

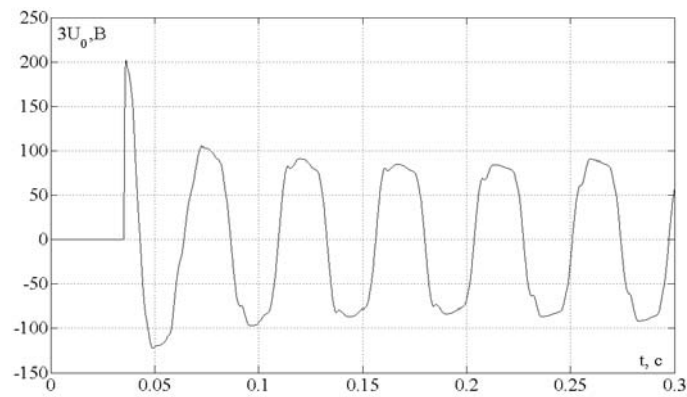


Рис. 5. Напряжение на выводах обмотки разомкнутого треугольника при феррорезонансе,  $C_{\phi}=1$  мкФ

Одной из наиболее распространенных мер подавления феррорезонанса является включение в обмотку разомкнутого треугольника активного сопротивления величиной 25 Ом [1,4,7–9]. Данный способ защиты один из самых простых и дешевых. Защитное действие резистора заключается в шунтировании нелинейного магнитного шунта ТН и создании потерь энергии свободных колебаний составляющих нулевой последовательности. При этом необходимо отметить, что при постоянно включенном резисторе ТН будет дополнительно нагреваться за счет мощности, потребляемой резистором в нормальном режиме.

Ниже приведены расчетные кривые токов в обмотке ВН и напряжения  $3U_0$  при кратковременном ОДЗ для случая, когда в обмотку разомкнутого треугольника подключен резистор 25 Ом. При этом фазная емкость сети на землю равна 1 мкФ по аналогии с рис. 4. Из рис. 6 видно, что токи в обмотках и напряжение  $3U_0$  носят затухающий характер, что свидетельствует о подавлении феррорезонанса. Результаты показывают, что в данном конкретном случае установка резистора способствует полному подавлению феррорезонанса.

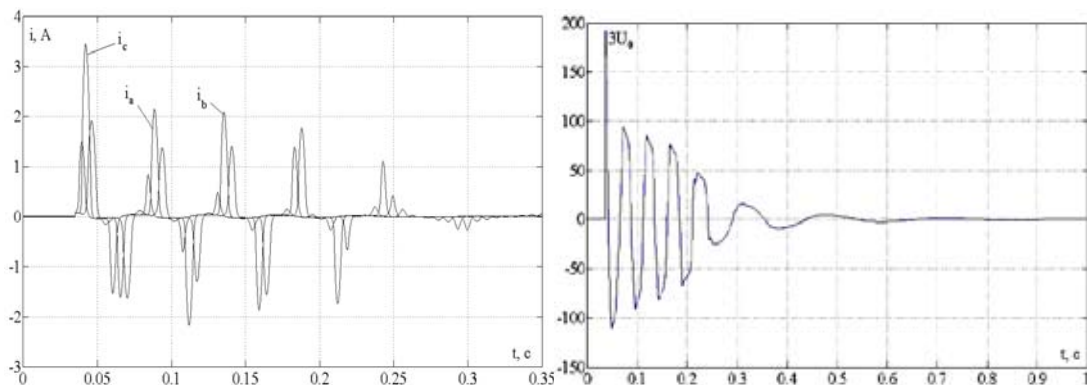


Рис. 6. Токи в обмотке ВН при включении резистора 25 Ом в обмотку разомкнутый треугольник,  $C_{\phi}=1$  мкФ

Для определения границ существования устойчивого феррорезонанса была произведена серия расчетов на созданной модели. Целью расчетов было получить действующие значения тока в обмотке ВН при различных значениях емкости сети. Для того чтобы максимально приблизить расчетную схему замещения к реальной, при моделировании учитывалась возможная несимметрия емкостей сети по фазам, несимметрия фаз ТН, отклонения напряжения источника питания. В случае возникновения феррорезонанса производились расчеты с нагрузочным резистором в обмотке разомкнутого треугольника и оценивалась эффективность данного способа борьбы с феррорезонансом.

Опасность с точки зрения термического воздействия на ТН данного типа представляют токи с эффективным значением выше 0,3 А [7]. Это соответствует изменению фазной

емкости сети в диапазоне 0,1..1,5 мкФ. Однако не следует считать, что лишь этот интервал фазных емкостей является границей существования устойчивого феррорезонанса. Фактором, свидетельствующим об отсутствии феррорезонанса, следует считать отсутствие напряжения на выводах обмотки разомкнутого треугольника или его равенство напряжению естественного небаланса, а не безопасное значение тока в обмотке ТН. При значениях емкости сети 0,005-0,1 мкФ, что эквивалентно емкости холостой ошиновки и оборудования или нескольким километрам воздушной линии, возможны феррорезонансные процессы без замыканий на землю. Малый емкостный ток компенсируется намагничивающим током одной из фаз ТН. Напряжение на этой фазе повышено, а на двух других понижено. В результате создается ложное впечатление о замыкании на землю. Токи в обмотке ВН составляют 20-50 мА, поэтому такой режим феррорезонанса к повреждению ТН, как правило, не приводит. Подытожив и обобщив вышесказанное, отмечаем, что зона существования феррорезонанса находится в пределах значений емкости сети от 0 до 1,5 мкФ.

Расчетным путем установлено, что применение нагрузочного резистора 25 Ом приводит к полному подавлению феррорезонанса во всей области его существования. В тоже время необходимо отметить, что результаты моделирования получены лишь для конкретных значений параметров сети, и, несмотря на осуществленный перебор всевозможных комбинаций (более 500 расчетов), исследовать все возможные ситуации не представляется возможным. Следовательно, о возможности существования феррорезонанса и эффективности мер борьбы с ним можно говорить лишь с определенной вероятностью.

Распространено мнение о том, что защитный резистор величиной 25 Ом малоэффективен. При этом в литературе приводится информация, согласно которой ТНКИ повреждаются независимо от наличия или отсутствия резистора в обмотке разомкнутого треугольника. Особое внимание заслуживает работа [7], в которой на основе натурального эксперимента было показано, что при существовании перемежающейся дуги ТН повреждается как при наличии, так и при отсутствии резистора. Соответственно делается вывод о том, что при существовании феррорезонанса резистор в обмотке разомкнутого треугольника неэффективен.

Авторы данной статьи считают, что подобные случаи нельзя отнести к феррорезонансу. Основным фактором, определяющим рост тока в обмотке ТН, является перевозбуждение трансформатора, вызванное дуговыми перенапряжениями. Так, при повышении напряжения на ТН до  $1,73U_{\phi}$  рабочая индукция равна 1,6–1,65 Тл. Дальнейшее увеличение напряжения приведет к глубокому насыщению стали трансформатора с соответствующим ростом тока. Дуговым перенапряжениям характерны кратности 2,5–3  $U_{\phi}$  [1, 10], соответственно, следует ожидать значительное увеличение тока в обмотке ВН. Резистор в обмотке разомкнутого треугольника практически не оказывает влияния на кратности перенапряжений, возникающих при перемежающихся ОДЗ, и лишь в некоторой степени демпфирует феррорезонансные процессы, которые, безусловно, сопровождают процесс ОДЗ. На рис. 7 приведены расчетные кривые фазных напряжений и токов в обмотке ВН трансформатора при перемежающемся дуговом замыкании и установке балластного резистора, которые подтверждают вышеописанные рассуждения. При этом токи в обмотке ВН трансформатора в несколько раз превышают ток термической стойкости ТН.

В данном случае для предотвращения повреждения ТН следует предусмотреть меры, ограничивающие перенапряжения при ОДЗ. Наиболее эффективным способ ограничения перенапряжений является резистивное заземление нейтрали сети [9, 11-14]. Резистор выбирается из условий равенства емкостной и активной составляющей тока замыкания на землю. Этим обеспечивается полное стекание зарядов в паузу между повторными замыканиями, и, соответственно, отсутствие перенапряжений. Следовательно, следует ожидать и безопасных значений токов в обмотке ТНКИ.

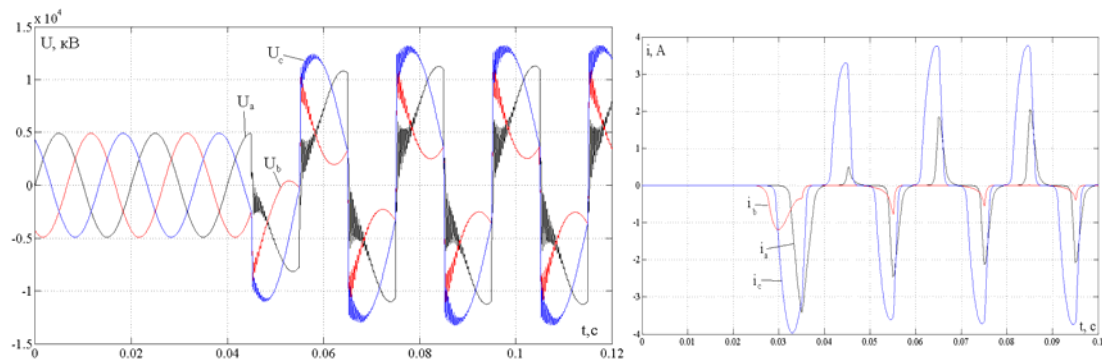


Рис. 7. Фазные напряжения и токи в обмотке ВН при перемежающемся ОДЗ и изолированной нейтрали сети. В обмотке разомкнутого треугольника установлен резистор 25 Ом,  $C_{\phi}=2$  мкФ

Для подтверждения вышесказанного были произведены соответствующие расчеты, результаты которых приведены на рис. 8. Из осциллограмм видно, что кратности перенапряжений не превышают  $1,8 U_{\phi}$  и токи в обмотках не превышают допустимых значений.

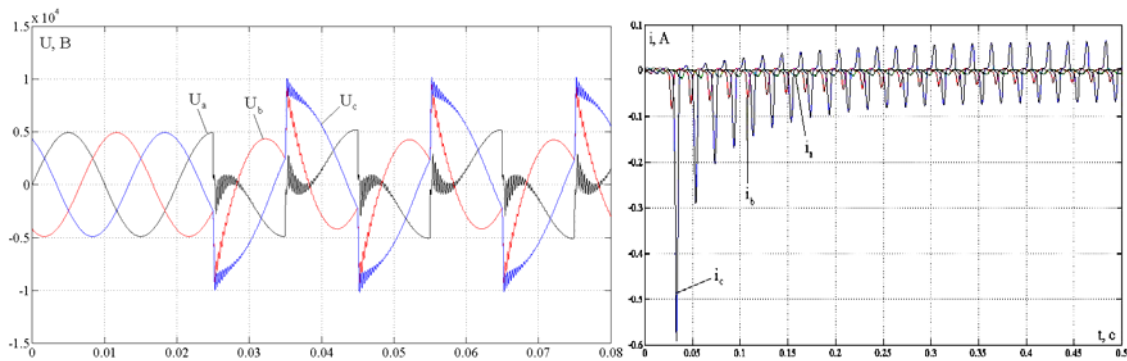


Рис. 8. Фазные напряжения и токи в обмотке ВН при перемежающемся ОДЗ. Нейтраль заземлена через резистор,  $C_{\phi}=2$  мкФ

### Выводы

1. Феррорезонанс возможен при изменении  $C_{\phi}$  от 0 до 1,5 мкФ, что эквивалентно емкостному току 0-5 А. Фактором, свидетельствующем о подавлении феррорезонанса, следует считать отсутствие напряжения на выводах обмотки разомкнутого треугольника или его равенство напряжению небаланса, а не безопасное значение тока в обмотке ТНКИ. Рекомендуется повсеместная установка балластных резисторов величиной 25 Ом в обмотку разомкнутого треугольника для предотвращения феррорезонанса.

2. Следует отличать феррорезонанс от токовой перегрузки ТН вследствие перевозбуждения повышенным напряжением. При решении проблемы феррорезонанса следует параллельно решать вопрос выбора режима нейтрали сети. Оптимальным с точки зрения подавления феррорезонанса и ограничения перенапряжений при ОДЗ является резистивное заземление нейтрали. Эффективным способом предотвращения глубокого насыщения и повреждения ТН при значительных перенапряжениях является уменьшение рабочей индукции ТН. Так при уменьшении ее в 2 раза при перенапряжениях  $2,5-3 U_{\phi}$  трансформатор не будет чрезмерно насыщаться и сможет выдерживать такой режим сколько угодно долго.

### Список литературы

1. Зихерман М. Х. Повреждение трансформаторов напряжения при дуговых замыканиях на землю / М. Х. Зихерман. – Электрические станции, 1978, № 11. – С. 65–67.

2. Ганус А. И. Влияние условий переходных процессов в электрических сетях 6-35 кВ на характер повреждения трансформаторов напряжений / А. И. Ганус, Ф. П. Говоров, К. А. Старков. – Сборник трудов V международной научной конференции «Эффективность и качество электроснабжения промышленных предприятий» – Мариуполь, 2005. – С. 190–194.
3. Шаргородский В. А. Автоколебательный процесс – причина повреждения трансформаторов напряжения / В. А. Шаргородский. – Электрические станции, 1963. – № 5. – С. 59–64.
4. Лихачев Ф. А. Схемы подключения дополнительного сопротивления к трансформатору напряжения контроля изоляции / Ф. А. Лихачев. – Электрические станции, 1978. – № 12. – С. 75–76.
5. Лихачев Ф. А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и компенсацией емкостных токов / Ф. А. Лихачев. – М.: Энергия, 1971. – 152 с.
6. Заболотников А. П. Математическое моделирование и перенапряжения в электрических сетях 6...35 кВ / А. П. Заболотников, К. П. Кадомская, А. А. Тихонов. – Новосибирск, 1993. – 158 с.
7. Зихерман М. Х. Исследование режимов работы трансформаторов напряжения контроля изоляции в сетях 6–10 кВ / М. Х. Зихерман, С. Г. Дунайцев, В. Г. Алексеев. – Электрические станции, 1980, № 1. – С. 56–59.
8. Дударев Л. Е. Численный анализ феррорезонансных процессов в сети с изолированной нейтралью / Л. Е. Дударев, И. В. Волошек, А. И. Левковский. – Электрические станции, 1991, № 1. – С. 66–71.
9. Сивокобыленко В. Ф. Повышение надежности работы карьерных сетей при однофазных замыканиях на землю / В. Ф. Сивокобыленко, В. К. Лебедев, А. В. Ковязин, Р. П. Сердюков, С. А. Кряжок, А. И. Гребенкин, В. В. Зубенко, И. Э. Рябчук – Вестник ДонНТУ. Серия электротехника и энергетика № 9, 2009 – С. 211–221.
10. Сиротинский Л. И. Техника высоких напряжений. Волновые процессы и внутренние перенапряжения в электрических системах. – М: Госэнергоиздат, 1959.
11. Миронов И. А. Режимы заземления нейтрали в электрических сетях 6-35 кВ / И. А. Миронов. – Электрические станции, 2008, № 4. – С. 60–69.
12. Софинский А. В Резистивное заземление нейтрали в сети собственных нужд Энгельсской ТЭЦ-3 Саратовэнерго / А. В. Софинский. – Электрические станции. – 2003, № 2. – С. 34–36.
13. Стогний Б. С. О необходимости изменений режимов нейтрали в сетях 6–35 кВ / Б. С. Стогний, В. В. Масляник, В. В. Назаров, П. Д. Нагорный, Н. А. Демченко, А. А. Жереб. – Энергетика и электрификация. – 2001, № 4. – С. 27–29.
14. Назаров В. В. О режимах нейтрали сетей 6–35 кВ / В. В. Назаров. – Промышленная энергетика. – 1993, № 6. – С. 33–36.

**DETERMINATION OF THE BOUNDARIES OF EXISTENCE OF FERRORESONANCE IN THE NETWORK WITH THE INSULATED NEUTRAL AND THE ELECTROMAGNETIC VOLTAGE TRANSFORMERS VTOI-6-66 ON THE BASIS ON THE COMPUTER SIMULATION**

Y. L. SAENKO, D-r Tech. Scie, Pf.  
A.S. POPOV, graduate student

*In the article are given the results of investigating the ferroresonance processes in the network 6 kV with the insulated neutral and the electromagnetic voltage transformers of the type VTOI-6-66. The boundaries of existence of steady ferroresonance are determined. The effectiveness of the protective action of resistor in the winding of the extended triangle to the ferroresonance suppression is evaluated.*

*Поступила в редакцию 08.11 2010 г.*