

УДК 631.314.222.8

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ ГАШЕНИЯ ФЕРРОРЕЗОНАНСНЫХ КОЛЕБАНИЙ
В СЕТЯХ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ****Ю. Л. Саенко, А. С. Попов**Государственное высшее учебное заведение «Приазовский государственный технический университет»
ул. Университетская, 7, г. Мариуполь, 87500, Украина. E-mail: artempopov9@gmail.com

Рассмотрена проблема гашения феррорезонансных колебаний в сетях с изолированной нейтралью. Проанализированы известные подходы при исследовании явления феррорезонанса. Разработана математическая модель электрической сети с изолированной нейтралью. Выявлены особенности протекания феррорезонансных переходных процессов в электрических сетях с изолированной нейтралью. Приведены результаты экспериментального обследования серии однотипных трансформаторов напряжения, в частности, вебер-амперные характеристики. Показано, что активное сопротивление, которое необходимо ввести в колебательный контур для гашения феррорезонанса, зависит от фазной емкости сети и качества стали сердечника трансформатора напряжения. Предложено учитывать качество стали сердечника трансформатора напряжения по величине тока холостого хода, измеренного со стороны вторичной обмотки. Получено аналитическое выражение для определения критического сопротивления по условию гашения феррорезонанса в зависимости от параметров сети.

Ключевые слова: феррорезонанс, трансформатор напряжения, вебер-амперная характеристика, мгновенная мощность, критическое сопротивление.

**ВИЗНАЧЕННЯ УМОВ ГАСІННЯ ФЕРРОРЕЗОНАНСНИХ КОЛИВАНЬ
У МЕРЕЖАХ З ІЗОЛЮВАНЮ НЕЙТРАЛЛЮ****Ю. Л. Саенко, А. С. Попов**Державний вищий навчальний заклад «Приазовський державний технічний університет»
вул. Університетська, 7, м. Маріуполь, 87500, Україна. E-mail: artempopov9@gmail.com

Розглянуто проблему гасіння феррорезонансних коливань у мережах з ізолюваною нейтраллю. Проаналізовано відомі підходи при дослідженні явища феррорезонансу. Розроблено математичну модель електричної мережі з ізолюваною нейтраллю. Виявлено особливості протікання феррорезонансних перехідних процесів в електричних мережах з ізолюваною нейтраллю. Наведено результати експериментального обстеження серії однотипних трансформаторів напруги, зокрема, вебер-амперні характеристики. Показано, що активний опір, який потрібно ввести до коливного контуру для гасіння феррорезонансу, залежить від фазної ємності мережі та якості сталі осердя трансформатора напруги. Запропоновано враховувати якість сталі осердя трансформатора напруги за величиною струму неробочого ходу, що вимірюється з боку вторинної обмотки. Запропоновано аналітичне вираження для визначення критичного опору за умовою гасіння феррорезонансу залежно від параметрів мережі.

Ключові слова: феррорезонанс, трансформатор напруги, вебер-амперна характеристика, миттєва потужність, критичний опір.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Общеизвестной проблемой электрических сетей с изолированной нейтралью является проблема феррорезонанса. Феррорезонансные колебания развиваются между емкостью нулевой последовательности сети и нелинейной индуктивностью измерительных трансформаторов напряжения контроля изоляции (ТНКИ). Характерным является тот факт, что подобные процессы возникают при относительно малом токе замыкания на землю (1–5 А) и сопровождаются массовыми повреждениями ТНКИ, ложными срабатываниями защиты от замыканий на землю, перенапряжениями.

В настоящее время сформирован ряд научных школ, изучающих проблему феррорезонанса. В работах зарубежных авторов, например [1–3], основное внимание уделяется совершенствованию математических моделей для исследования феррорезонансных процессов (ФРП). В первую очередь, совершенствуется математическая модель нелинейной индуктивности за счет учета явления гистерезиса, что позволяет уточнить область существования устойчивого феррорезонанса.

В работе [4] рассмотрен принцип действия устройства защиты от ФРП, основанного на использо-

вании термистора и балластного резистора, которые подключаются к обмотке разомкнутого треугольника. На основании математического моделирования оценивается эффективность работы данного устройства. Автором [5] предложено устройство защиты от феррорезонанса, в основу которого положено использование аналогового LC-фильтра, настроенного на промышленную частоту, и балластного резистора, установленного последовательно с фильтром. Данное устройство подключается к обмотке разомкнутого треугольника.

В работах [6–8] предложены новые способы определения области существования устойчивого феррорезонанса, основанные на применении методов нелинейной динамики и диаграмм бифуркаций. В отличие от известных методов определения области существования устойчивого феррорезонанса, основанных на простом переборе параметров сети, применение методов нелинейной динамики позволяет гарантированно определить параметры сети, при которых возможно развитие ФРП.

Автором [9] определены области существования устойчивого феррорезонанса для различных типов ТНКИ, предложены устройства защиты от ФРП се-

мейства ПЗФ, розроблена і успішно введена конструкція антирезонансного трансформатора напруги (ТН) типу НТН. Значительний об'єм досліджень даного автора присвячений оцінці ефективності застосування антирезонансних трансформаторів напруги, а також удосконаленню їх конструкції.

Незважаючи на широку відомість проблеми феррорезонанса, на сьогоднішній день відсутній методика визначення умов гашення ФРП в залежності від параметрів мережі. Відомо, що при певній величині активних втрат в феррорезонансному контурі розвиток стійких коливань стане неможливим, тому визначення науковий інтерес представляє виявлення взаємозв'язків між параметрами електричної мережі і вимогами до демпфуючих пристроїв.

Метою даної роботи є встановлення аналітичних взаємозв'язків між параметрами електричної мережі і величиною балластного резистора, необхідного за умови гашення феррорезонансних коливань, а також визначення умов гашення ФРП в мережах з ізолюваною нейтраллю.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ІСЛЮДОВАНЬ

Для розв'язання поставленої задачі була створена математична модель електричної мережі 6 кВ з ізолюваною нейтраллю. Схема заміщення даної мережі наведено на рис. 1. В розрахунках прийнято трансформатор напруги типу НТМІ-6, параметри ТН були визначені експериментально. В ході моделювання варіювалася ємність електричної мережі, при цьому визначалася величина мінімально необхідних активних втрат в феррорезонансному контурі за умови гашення коливань.

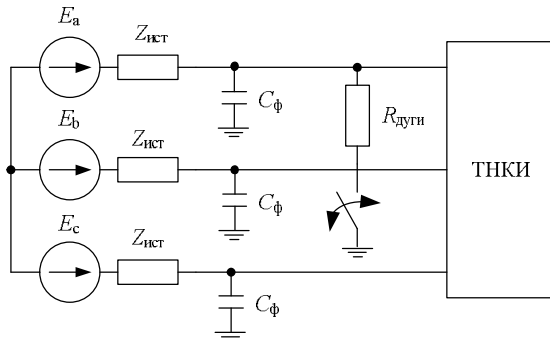


Рисунок 1 – Схема заміщення мережі з ізолюваною нейтраллю для дослідження перехідних процесів

Для розв'язання даної задачі в математичній моделі передбачено алгоритм, що дозволяє проводити розрахунок феррорезонансної схеми циклічно з зміною параметрів моделі до тих пор, поки ФРП не стануть затухаючими, т.е. до тих пор, поки не настануть умови сльву феррорезонанса. Змінною величиною в моделі є активне опір гасячого резистора при фіксованій фазній ємності мережі. З урахуванням попередньо заданого кроку зміни балластного опору проводиться розрахунок схеми до тих пор, поки не настануть умови сльву феррорезонанса, критерієм якого є затухання напруги нульової послі-

дователності. Після цього визначається величина активних втрат в феррорезонансному контурі на попередньому етапі розрахунку, на якому феррорезонанс ще існував. Ці втрати, що відповідають граничному випадку існування феррорезонанса, назовемо «критичними втратами» ($P_{кр}$). Збільшення втрат понад це значення обов'язково веде до сльву коливань. Відповідний цим втратам резистор будемо називати «критичним опором» ($R_{кр}$).

Для пояснення розглянемо наступний приклад. Припустимо, виконується цикл розрахунку моделі мережі з фазною ємністю 0,4 мкФ при початковому значенні опору обмотки високої напруги (ВН) трансформатора 1200 Ом, і воно збільшується з кожним етапом виконання розрахунку на 10 Ом до тих пор, поки феррорезонанс не стане затухаючим. При опорі 1850 Ом умови існування стійкого феррорезонанса порушуються, відповідно, критичним опором в цьому випадку є значення на попередньому етапі розрахунку, т.е. 1840 Ом.

Джерелами втрат в ТНКИ є втрати в сталі і обмотках. Нагрузка вторинних обмоток також надає певний демпфуючий ефект на процеси феррорезонанса. В нормальному режимі втрати в обмотках незначительні і складають не більше 0,5 Вт на фазу, що суттєво менше втрат в сталі при номінальному напругуванні, які складають порядку 5 Вт на фазу. В режимі феррорезонанса ситуація кардинально змінюється, і при виникненні струмів в обмотці ВН амплітудою декількох Ампер втрати в ній складають сотні ватт, в той час як втрати в сталі збільшуються незначительно, оскільки визначаються фазним напругуванням, незначительно змінюючись при ФРП.

Для визначення сумарних активних втрат в ТНКИ на основі отриманих в результаті розрахунку режиму роботи схеми миттєвих значень фазних напруг і струмів в обмотці ВН трансформатора визначається миттєва потужність на вході ТН за відомою формулою:

$$P_{ТН}(t) = u_a(t) \cdot i_a(t) + u_b(t) \cdot i_b(t) + u_c(t) \cdot i_c(t), \quad (1)$$

де $u_a(t), u_b(t), u_c(t)$ – фазні напруги, В; i_a, i_b, i_c – струми в обмотці ВН трансформатора, А.

Інтегруючи миттєву потужність за період існування ФРП, визначається активна енергія і активна потужність, що виділяється в ТН. В ході обробки результатів розрахунку схеми також визначається дійсний значення струму в обмотці ВН і напруги $3U_0$ на виводах обмотки розімкнутого трикутника.

Визначив сумарні втрати потужності в ТНКИ, дійсні значення струмів в обмотках ВН і напруги $3U_0$, визначимо окремо втрати в сталі і обмотках ТН. Розподіл втрат між собою дозволить в ході досліджень перевірити гіпотезу, згідно якої ефективність гасячих резисторів, встановлених послідовно і паралельно з феррорезонансним контуром, різниця

между собой. Другими словами, одна и та же активная мощность, введенная последовательно и параллельно с феррорезонансным контуром обладает различным демпфирующим эффектом. При этом далее будут рассмотрены варианты гашения феррорезонанса балластным резистором в обмотке ВН и обмотке разомкнутого треугольника.

Рассмотрим следующий пример. В сети с фазной емкостью 0,5 мкФ кратковременно возникает и самоустраняется однофазное замыкание на землю, в результате чего возбуждается субгармонический феррорезонанс. Расчетная кривая мгновенной мощности на входе ТНКИ при субгармоническом ФРП приведена на рис. 2.

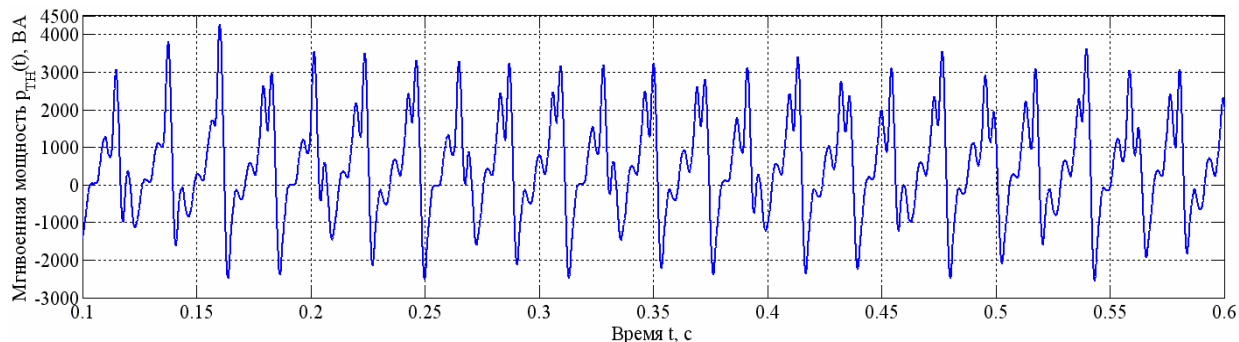


Рисунок 2 – Расчетная кривая мгновенной мощности на входе ТНКИ при субгармоническом ФРП

В данном режиме феррорезонанса суммарные потери в ТН составили 475 Вт, из них 450 Вт выделяется в обмотках ВН трансформатора, 25 Вт – в стали ТН. Нагрузка основной и дополнительной вторичных обмоток равна нулю. Среднеквадратическое значение тока по фазам составило 366, 388 и 376 мА соответственно, действующее значение напряжения $3U_0$ составило 88,7 В.

Далее необходимо отдельно определить критические потери в случае гашения феррорезонанса балластным сопротивлением в обмотке ВН и в обмотке разомкнутого треугольника. Для этого в алгоритме предусмотрено следующее.

При гашении феррорезонанса активным сопротивлением в обмотке ВН и определении критических потерь для этого случая сопротивление, моделирующее потери в стали ТН, принимается бесконечно большой величиной, чтобы потери в стали не оказывали дополнительного демпфирующего эффекта. Нагрузка основной и дополнительной вторичной обмотки также принимается равной нулю. При гашении феррорезонанса резистором в обмотке разомкнутого треугольника и определении критиче-

ских потерь для этого случая сопротивление обмоток ВН, а также нагрузка основной вторичной обмотки ТН при моделировании принимаются равными нулю.

В результате проведения подобных расчетов можно оценить, какая мощность требуется для гашения ФРП в случае введения дополнительных потерь последовательно и параллельно с феррорезонансным контуром при прочих равных параметрах сети, а также сравнить демпфирующие свойства резисторов, подключенных по различной схеме.

В табл. 1 приведены результаты расчета величины критических потерь ($P_{кр}$), критического сопротивления ($R_{кр}$), максимального действующего значения тока в обмотке ВН ($I_{вн.мах}$), напряжения $3U_0$ и частоты феррорезонанса ($f_{фер}$) для обоих случаев подключения гасящего резистора в зависимости от фазной емкости сети. В ходе расчетов было выявлено, что область существования устойчивого феррорезонанса для сети с ТН типа НТМИ-6 заключена в диапазоне изменения фазной емкости 8 пФ–0,62 мкФ. Нижняя граница соответствует емкости ненагруженных шин.

Таблица 1 – Результаты расчета величины критических потерь, критического сопротивления, максимального действующего значения тока в обмотке ВН, напряжения $3U_0$ и частоты феррорезонанса в зависимости от фазной емкости сети

Фазная емкость, мкФ	Гашение феррорезонанса балластным резистором в обмотке ВН					Гашение феррорезонанса балластным резистором в обмотке разомкнутого треугольника				
	$P_{кр}$, Вт	$R_{кр}$, Ом	$I_{вн.мах}$, мА	$3U_0$, В	$f_{фер}$, Гц	$P_{кр}$, Вт	$R_{кр}$, Ом	$I_{вн.мах}$, мА	$3U_0$, В	$f_{фер}$, Гц
0,62	602	1255	461	81	25	181	46	443	92	25
0,5	470	1662	351	77	25	130	64	362	87	25
0,4	329	2090	254	73	25	94	78	315	84	25
0,3	192	2750	178	64	25	61	101	236	78	25
0,2	81	4010	90	53	25	25	168	119	62	25
0,1	13,4	6600	27	27,5	25	3,9	325	41	35	25
0,015	111	5150	91	224	100	43	406	43	132	100
0,01	86	8300	66	185	100	31	451	31	118	100
0,008	64	16500	40	139	150	23	690	37	126	150

Обобщенные результаты для случая гашения субгармонического феррорезонанса ($f_{\text{фер}}=25$ Гц) балластным резистором в обмотке ВН приведены на рис. 3. Анализ полученных результатов позволил выявить следующее. При субгармоническом ФРП снижение фазной емкости приводит к уменьшению действующего значения тока в обмотках ВН, напряжения $3U_0$, величины критических потерь в кон-

туре. Это, в свою очередь, обусловлено снижением запасов энергии в феррорезонансном контуре при уменьшении фазной емкости сети. Другими словами, чем меньше фазная емкость сети, тем меньше запасы энергии в реактивных элементах феррорезонансного контура, и тем проще подавить такой ФРП.

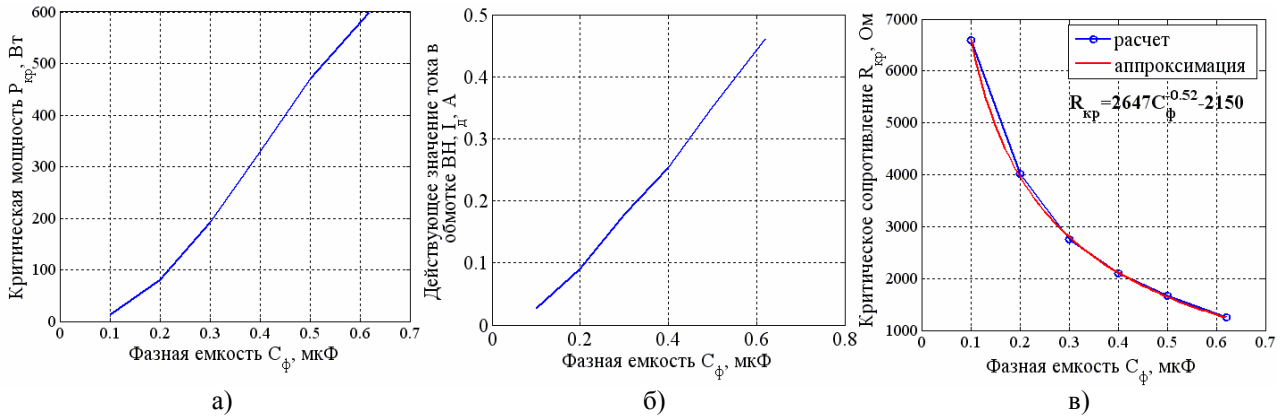


Рисунок 3 – Зависимость критических потерь (а), действующего значения тока в обмотке ВН (б), критического сопротивления (в) от фазной емкости сети при гашении субгармонического феррорезонанса балластным резистором в обмотке ВН

Как следует из рис. 3,а, критические потери в контуре растут практически линейно с увеличением емкости, аналогичный характер имеет зависимость действующего тока в обмотке ВН от фазной емкости сети, которая изображена на рис. 3,б. В свою очередь, зависимость критического сопротивления от фазной емкости сети, изображенная на рис. 3,в, имеет нелинейный характер, и с увеличением емкости критическое сопротивление уменьшается. Полученная в результате расчета зависимость $R_{\text{кр}}(C_{\text{ф}})$ (рис. 3,в) достаточно точно аппроксимируется выражением $R_{\text{кр}}(C_{\text{ф}}) = 2647 \cdot C_{\text{ф}}^{-0.52} - 2150$. Данная зависимость также приведена на рис. 3,в.

При гашении феррорезонанса резистором в обмотке разомкнутого треугольника ситуация принципиально изменяется. Величина критических по-

терь в этом случае оказывается в среднем в 3,4 раза ниже, чем при подключении демпфирующего резистора в обмотку ВН (табл. 1). Очевидно, что эффективность двух способов подключения гасящего резистора принципиально различна между собой и явным преимуществом обладает способ введения потерь параллельно феррорезонансному контуру.

Обобщенные результаты для случая гашения субгармонического феррорезонанса балластным сопротивлением в обмотке разомкнутого треугольника приведены на рис. 4, на котором отображены зависимости критических потерь (рис. 4,а), критического сопротивления (рис. 4,б), действующего значения тока в обмотке ВН (рис. 4,в) от фазной емкости сети.

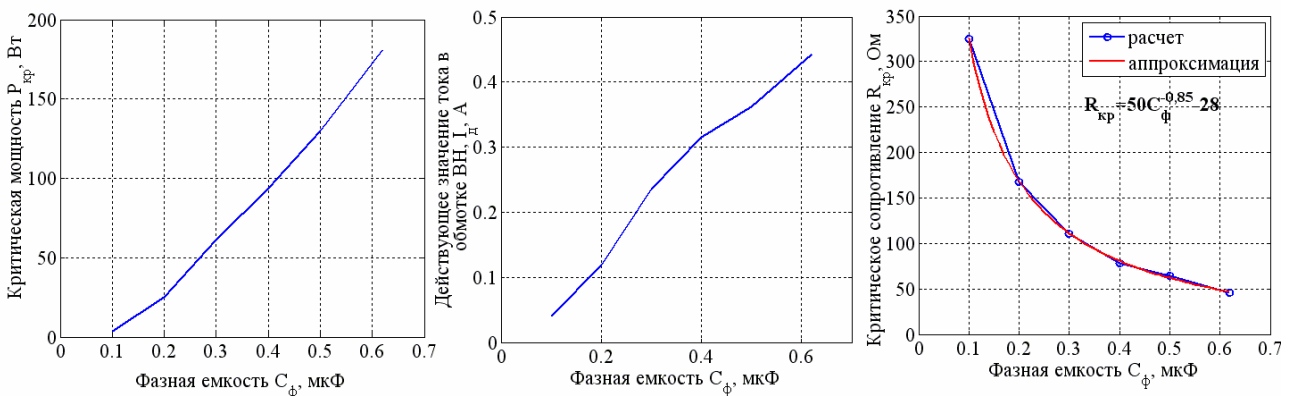


Рисунок 4 – Зависимость критических потерь (а), действующего значения тока в обмотке ВН (б), критического сопротивления (в) от фазной емкости сети при гашении субгармонического феррорезонанса балластным сопротивлением в обмотке разомкнутого треугольника

Полученные зависимости аналогичны результатам, приведенным на рис. 3. С ростом емкости растет величина критических потерь, действующего значения тока в обмотке ВН, а также уменьшается величина критического сопротивления. Более высокая эффективность гашения феррорезонанса введением потерь параллельно с феррорезонансным контуром объясняется следующим.

Потери в последовательном контуре определяются среднеквадратическим значением тока в обмотке ВН, в то время как потери в параллельном контуре определяются среднеквадратическим значением напряжения $3U_0$. При изменении фазной емкости сети от 0,62 до 0,1 мкФ и гашении ФРП резистором последовательно с феррорезонансным контуром действующее значение тока изменяется от 461 до 27 мА, при гашении феррорезонанса резистором в параллельном контуре действующее значение напряжения $3U_0$ уменьшается от 92 до 35 В (табл. 1). Таким образом, ток обмотки ВН уменьшается в 17 раз, а напряжение $3U_0$ уменьшается всего в 2,6 раза. Именно поэтому подход с введением балластного резистора в параллельный контур является более эффективным. Не менее важным аспектом, обуславливающим более высокую эффективность гашения феррорезонанса резистором параллельно с феррорезонансным контуром, является шунтирование нелинейной индуктивности ТН, чего не происходит при введении потерь в последовательный контур.

Немаловажным фактором, определяющим условия гашения феррорезонанса и требования к демпфирующим устройствам, является вебер-амперная характеристика ТНКИ. Как известно, параметры даже однотипных трансформаторов напряжения могут существенно отличаться друг от друга, что прямым образом повлияет на результаты моделирования, а именно на область существования устойчивого феррорезонанса, величину критических потерь и критического сопротивления.

Результаты моделирования, приведенные выше, получены для усредненной (базовой) характеристики намагничивания, полученной в результате обследования 27 однотипных трансформаторов. Данная характеристика приведена на рис. 5.

В ходе экспериментов было выявлено, что закон распределения вебер-амперных характеристик приближается к нормальному, однако ввиду ограниченного числа экспериментов судить об этом можно с некоторым допущением. По результатам экспериментов был определен диапазон $\pm 3\sigma$ для данного случая. Он соответствует разбросу кривых намагничивания в диапазоне $\pm 20\%$ относительно базовой. Базовая вебер-амперная характеристика, а также

характеристики с учетом разброса $\pm 20\%$ относительно базовой приведены на рис. 5.

Характеристики намагничивания, расположенные ниже базовой, соответствуют трансформаторам с ухудшенными магнитными характеристиками, что может быть обусловлено старением стали сердечника, ослаблением болтов стяжки магнитопровода, некачественной сборкой сердечника после ремонта и др. Соответственно, трансформаторы, характеристика которых располагается выше базовой, относят к трансформаторам с улучшенными магнитными характеристиками.

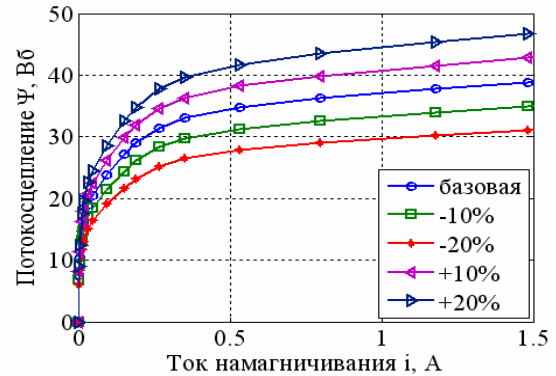


Рисунок 5 – Вебер-амперные характеристики ТН типа НТМИ-6 с учетом отклонения в диапазоне $\pm 20\%$

В первую очередь параметры вебер-амперной характеристики влияют на область существования устойчивого феррорезонанса. В табл. 2 приведены результаты расчета верхней границы существования феррорезонанса (в мкФ) при различных характеристиках намагничивания. Как следует из результатов расчета, при снижении характеристики намагничивания по отношению к базовой область существования феррорезонанса пропорционально расширяется. И наоборот, трансформаторам с улучшенными магнитными характеристиками соответствует более узкая область существования феррорезонанса.

Немаловажным является факт влияния параметров вебер-амперной характеристики на запасы энергии в контуре нулевой последовательности и на требования к демпфирующим устройствам. В табл. 2 приведены результаты расчета критического сопротивления, соответствующего верхней границе феррорезонанса, для различных характеристик намагничивания трансформаторов при гашении феррорезонанса резистором в обмотке разомкнутого треугольника.

Таблица 2 – Результаты расчета критического сопротивления, соответствующего верхней границе феррорезонанса, для различных характеристик намагничивания трансформаторов при гашении феррорезонанса резистором в обмотке разомкнутого треугольника

Тип кривой	Кривая -20 %	Кривая -10 %	Базовая	Кривая +10 %	Кривая +20 %
Верхняя граница феррорезонанса $C_{пред}$, мкФ	0,78	0,7	0,62	0,57	0,51
Критическое сопротивление $R_{кр}$, Ом	16	27	43	65	78

Кик видно из результатов, для успешного гашения феррорезонанса с трансформаторами с ухудшенными магнитными характеристиками следует уменьшать величину сопротивления в обмотке разомкнутого треугольника и наоборот. Можно констатировать, что при одной и той же фазной емкости сети для трансформаторов с ухудшенными магнитными свойствами величина критических потерь оказывается выше, чем для трансформаторов с улучшенными магнитными свойствами. Другими словами, погасить феррорезонанс с трансформаторами с ухудшенными магнитными характеристиками оказывается сложнее, чем с трансформаторами с улучшенными магнитными свойствами.

Поскольку на область существования устойчивого феррорезонанса и требования к демпфирующим устройствам существенное влияние оказывает качество стали сердечника трансформатора, целесообразным является учет текущего состояния сердечника при моделировании и определении величины балластного резистора.

Количественным показателем, характеризующим качество стали ТНКИ, является величина тока холостого хода, измеренная при номинальном напряжении. Введем параметр, характеризующий качество стали ТНКИ – $k_{ст}$. Очевидно, что чем выше ток холостого хода трансформатора, тем ниже качество сердечника и тем меньшее сопротивление следует ввести в контур для гашения колебаний и наоборот. Методика определения $k_{ст}$ по данным результатов измерения действующего значения тока холостого хода со стороны обмотки низкого напряжения приведена ниже.

При оценке качества стали сердечника на основании результатов измерения тока холостого хода достаточно использовать не всю вольт-амперную характеристику (ВАХ), а лишь одно измеренное значение. В качестве такой точки целесообразно выбрать вторичное фазное напряжение величиной 100 В, при этом потокосцепление обмотки будет равно $\sqrt{3}\Psi_{ном}$. При таком значении потокосцепления сталь ТН близка к насыщению, поэтому незначительные отличия в токе холостого хода выявить весьма просто.

С учетом разброса вебер-амперной характеристики в пределах $\pm 20\%$, относительно базовой, расчетным путем были определены действующие значения тока холостого хода при действующем значении вторичного фазного напряжения 100 В. Полученные результаты сопоставлены с расчетом критического сопротивления для соответствующих характеристик намагничивания (табл. 1) и приведены в табл. 3.

Примем коэффициент $k_{ст}$ равным 1 для базовой характеристики намагничивания, для других вариантов – равным отношению критического сопротивления, соответствующей данной вебер-амперной характеристике, к критическому сопротивлению, соответствующему базовой кривой. Результаты расчета, связывающие качество стали ТН и величину тока холостого хода вторичной обмотки ТН отображены в таблице 3. Математический смысл коэффициента $k_{ст}$ заключается в приведении текущей характеристики намагничивания ТН к параметрам базовой.

Таблица 3 – Результаты расчета, связывающие качество стали ТН и величину тока холостого хода вторичной обмотки ТН

Параметры характеристики намагничивания	$I_{х.х.}, А$	$R_{кр}, Ом$	$k_{ст}$
Кривая -20 % от базовой. $C_{пред} = 0,78$ мкФ	9,46	16	0,37
Кривая -10 % от базовой. $C_{пред} = 0,7$ мкФ	6,27	26	0,6
Базовая кривая. $C_{пред} = 0,62$ мкФ	4,46	43	1
Кривая +10 % от базовой. $C_{пред} = 0,57$ мкФ	3,14	65	1,51
Кривая +20 % от базовой. $C_{пред} = 0,51$ мкФ	2,24	78	1,81

Полученная зависимость коэффициента качества стали $k_{ст}$ от величины тока холостого хода ТН $I_{х.х.}$ изображена на рис. 5 и достаточно точно аппроксимируется выражением $k_{ст}(I_{х.х.}) = 4,8I_{х.х.}^{-0,4} - 1,62$.

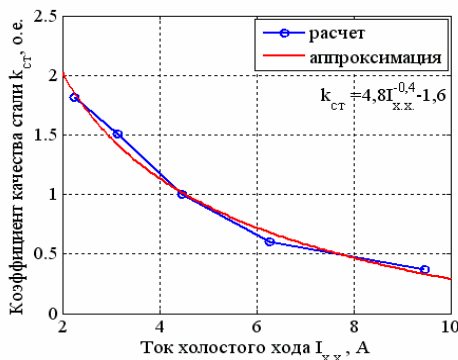


Рисунок 5 – Зависимость коэффициента качества стали $k_{ст}$ от тока холостого хода $I_{х.х.}$

Анализ приведенных выше выкладок позволят заключить, что балластное сопротивление, которое необходимо ввести в феррорезонансный контур для гашения устойчивых колебаний, зависит от фазной емкости сети (рис. 4) и от качества стали сердечника трансформатора (рис. 5), т.е. $R_{кр} = f(C_{\phi}, k_{ст})$.

Синтезировав зависимости $R_{кр} = f(C_{\phi})$ и $k_{ст} = f(I_{х.х.})$, получим зависимость $R_{кр} = f(C_{\phi}, k_{ст})$:

$$R_{кр} = k_n \cdot (4,8I_{х.х.}^{-0,4} - 1,62) \cdot (50C_{\phi}^{-0,25} - 28), \quad (2)$$

где k_n – коэффициент надежности, учитывающий возможные погрешности в расчете и измерениях, принимается равным 0,9–0,95; $I_{х.х.}$ – действующее значения тока холостого хода ТН, измеренное со

стороны обмотки НН при фазном напряжении 100 В, А; C_{ϕ} – максимальная фазная емкость сети в заданном режиме работы, мкФ.

Рассмотрим пример расчета критического сопротивления при следующих параметрах сети. Фазная емкость сети $C_{\phi} = 0,2$ мкФ, ток холостого хода ТН, измеренный со стороны вторичной обмотки при фазном напряжении 100 В $I_{x.x.} = 5$ А, коэффициент надежности примем равным 0,9. Требуемое сопротивление, подключаемое к обмотке разомкнутого треугольника по условию срыва феррорезонанса, равно:

$$R_{кр} = 0,9 \cdot (4,8 \cdot 5^{-0,4} - 1,62) \cdot (50 \cdot 0,2^{-0,25} - 28) = 38 \text{ Ом.}$$

Если в сети установлено несколько параллельных ТН, при определении критического сопротивления суммарную емкость сети C_{ϕ} следует разделить на число параллельно работающих трансформаторов. При этом балластное сопротивление следует устанавливать на каждом ТНКИ.

Полученные выше зависимости описывают взаимосвязь между параметрами сети и величиной балластного резистора, требуемой по условию гашения феррорезонанса. Можно констатировать, что чем выше емкость сети и хуже качество стали сердечника, тем большую активную мощность и, соответственно, меньшее активное сопротивление следует ввести в обмотку разомкнутого треугольника для гашения феррорезонанса. Важно отметить, что при некоторых параметрах сети достаточная величина балластного сопротивления может оказаться выше величины 25 Ом, которая широко известна и определена исходя из предельно допустимой мощности ТНКИ. В условиях эксплуатации стационарное подключение резистора 25 Ом к обмотке разомкнутого треугольника не нашло широко распространения ввиду термической перегрузки ТН в режиме длительного однофазного замыкания на землю. Определение параметров балластного резистора с учетом параметров сети по предложенной методике позволяют уточнить величину сопротивления и в случае допустимости применения такого резистора по условиям термической стойкости ТНКИ установить его стационарно.

Исследования, результаты которых приведены в данной статье, выполнены в рамках научно-исследовательской работы № 0113U001328 «Дослідження перенапруг в електричних мережах з ізольованою нейтраллю за наявності феррорезонансних явищ».

ВЫВОДЫ. 1. Проведенные исследования показали, что введение гасящего резистора параллельно с феррорезонансным контуром является гораздо более эффективным, чем последовательно с ним. При этом величина минимально необходимых активных потерь, вводимых параллельно с феррорезонансным контуром по условию гашения феррорезонанса, оказывается в 3,4 раза ниже по сравнению с введением потерь последовательно с феррорезонансным контуром.

2. Установлено, что параметры фазной емкости сети и нелинейной индуктивности ТНКИ определяют запасы энергии в контуре нулевой последовательности сети и непосредственно влияют на требования к устройствам гашения ФРП. На основе полученных результатов предложено аналитическое выражение для расчета величины балластного сопротивления для гашения ФРП в зависимости от фазной емкости сети и качества сердечника ТНКИ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Transformer Modeling for Low- and Mid-Frequency Transients – A Review / J. Martinez, Mork B. // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2005. – Vol. 20, Apr. – № 2. – PP. 1625–1632.
2. An accurate hysteresis model for ferroresonance analysis of a transformer / A. Rezaei-Zare, M. Sanaye-Pasand, H. Mohseni, Sh. Farhangi // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2008. – Vol. 23, July. – № 3. – PP. 1448–1456.
3. Impacts of hysteresis and magnetic couplings on the stability domain of ferroresonance in asymmetric three-phase three-leg transformers / S. Moses, M. Masoum, H. Toliyat // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2011. – Vol. 26, June. – № 2. – PP. 581–592.
4. Mitigating ferroresonance in voltage transformers in ungrounded MV networks / P. Wojciech, M. Florkowski, M. Fulczyk, P. Mahonen // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2007. – Vol. 22, Oct. – № 4. – PP. 2362–2369.
5. Damping of capacitive voltage substations ferroresonance using a suitable RLC filter / R. Aghazadeh, M. Sanaye-Pasand // IEE Proceeding Generation, Transmission & Distribution. – 2004. – Vol. 151. – № 6. – PP. 721–727.
6. Bifurcation analysis of three-phase ferroresonant oscillation in underground power systems / T. Craenenbroeck, W. Michiels, D. Dommelen, K. Lust // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1999. – Vol. 14, Apr. – № 2. – PP. 531–536.
7. Application of nonlinear dynamics and chaos to ferroresonance in distribution systems / B. Mork, D. Stuehm // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1994. – Vol. 9, Apr. – № 2. – PP. 1009–1017.
8. Ferroresonance in electromagnetic voltage transformers: a study based on nonlinear dynamics / Z. Emin, B. Zahavi, D. Auckland, Y. Tong // IEEE Proc. on Generation, Transmission, Distribution. – 1997. – Vol. 144. – PP. 383–387.
9. Журахівський А.В., Кенс Ю.А., Яцейко А.Я., Масляк Р.Я. Феррорезонансні процеси в електромережах 10 кВ з різнотипними трансформаторами напруги // Технічна електродинаміка. – 2010. – № 2. – С. 73–77.

DETERMINATION OF THE CONDITIONS OF FERRORESONANCE OSCILLATIONS DAMPING IN ISOLATED NEUTRAL SYSTEMS

Y. Sayenko, A. Popov

State Higher Educational Institution "Pryazovskyi State Technical University"

vul. Universitetstskaya 7, Mariupol, 87500, Ukraine. E-mail: artempopov9@gmail.com

The paper considers the problem of ferroresonance oscillations damping in the networks with isolated neutral point. The well-known approaches to study the ferroresonance phenomenon were analyzed. The authors have presented the mathematical model of electrical networks with isolated neutral developed. The peculiar features of the transient ferroresonance processes in such electrical networks were determined, and the results of experimental research on a series of similar voltage transformers were given, in particular for magnetization curve. It is shown that active resistance, that is needed to be put in the oscillation circuit for ferroresonance suppression, depends on the phase capacity of the network and quality of steel of the voltage transformer core. It is proposed to take into consideration the steel quality of the voltage transformer core using the no-load current of the transformer that measured on its secondary winding. The analytical expression defining the critical resistance for the condition of ferroresonance damping depending on the network parameters was obtained.

Key words: ferroresonance, voltage transformer, magnetization curve, instantaneous power, critical resistance.

REFERENCES

1. Martinez, J., Mork, B. (2005), "Transformer Modeling for Low- and Mid-Frequency Transients – A Review", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, no. 2, pp. 1625–1632.
2. Rezaei-Zare, A., Sanaye-Pasand, M., Mohseni, H., Farhangi Sh. (2008), "An accurate hysteresis model for ferroresonance analysis of a transformer", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 23, no. 3, pp. 1448–1456.
3. Moses, S., Masoum, M., Toliyat, H. (2011), "Impacts of hysteresis and magnetic couplings on the stability domain of ferroresonance in asymmetric three-phase three-leg transformers", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 26, no. 2, pp. 581–592.
4. Wojciech, P., Florkowski, M., Fulczyk, M., Mahonen, P. (2007), "Mitigating ferroresonance in voltage transformers in ungrounded MV networks", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 22, no. 4, pp. 2362–2369.
5. Aghazadeh, R., Sanaye-Pasand, M. (2004), "Damping of capacitive voltage substations ferroresonance using a suitable RLC filter", *IEE Proceeding*, vol. 151, no. 6, pp. 721–727.
6. Craenenbroeck, T., Michiels, W., Dommelen, D., Lust, K. (1999), "Bifurcation analysis of three-phase ferroresonant oscillation in underground power systems", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 14, no. 2, pp. 531–536.
7. Mork B., Stuehm D. (1994), "Application of nonlinear dynamics and chaos to ferroresonance in distribution systems", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 9, no. 2, pp. 1009–1017.
8. Emin, Z., Zahavi, B., Auckland, Y., Tong, Y. (1997), "Ferroresonance in electromagnetic voltage transformers: a study based on nonlinear dynamics", *IEEE Proc. on Generation, Transmission, Distribution*, vol. 144, pp. 383–387.
9. Zhurahivskiy, A.V., Kens, Yu.A., Yaceyko, A.Ya., Maslyak, R.Ya. (2010), "Ferroresonance processes in the networks 10 kV with different types of voltage transformer", *Tekhnichna elektrodynamika*, no. 2, pp. 73–77.

Стаття надійшла 05.02.2014.