

ИСТОЧНИК КОНТРОЛЬНОГО ТОКА ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ СЕТЕЙ С КОМПЕНСИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ

Р. А. ВАЙНШТЕЙН, А. В. ШМОЙЛОВ

Представлена научным семинаром кафедр электрических станций
и электрических сетей и систем

Вопрос выполнения селективной защиты от замыканий на землю сетей с компенсированной нейтралью остается актуальным в настоящее время [1]. Малая величина реактивной составляющей тока нулевой последовательности, а также неопределенность знака этой составляющей на поврежденном элементе вследствие регулирования режима компенсации заставляют сразу отказаться от использования ее для защиты. Распределение активной составляющей тока нулевой последовательности благоприятно для выбора поврежденного элемента. Однако величины этого тока в большинстве практических случаев ничтожно малы, что создает значительные трудности при разработке реагирующего органа. Исследования [1, 2] показывают, что защита, реагирующая на активную составляющую тока, в части практических случаев может оказаться удовлетворительной при соответствующем реагирующем органе.

В последнее время появились перспективные разработки [1, 3, 4], использующие для защиты искусственно накладываемый на сеть контрольный ток.

В [3] приведены исследования и разработка защиты сетей, использующие искусственно накладываемый на сеть контрольный ток с частотой 25 гц. Исследования, проведенные там же, а также дополнительные исследования показывают, что наиболее экономично и технически просто осуществить наложение контрольного тока на сеть можно посредством включения последовательно с дугогасящей катушкой источника контрольного тока (ИКТ).

Исследования показывают, что ИКТ в таком случае должен удовлетворять следующим требованиям:

1. Включение ИКТ не должно практически изменить режим дугогасящей катушки (ДГК), т. е. внутреннее сопротивление ИКТ для промышленной частоты должно быть близким к нулю.

2. Режим работы ИКТ не должен практически зависеть от тока дугогасящей катушки при замыкании на землю.

3. Частота контрольного тока должна быть ниже промышленной.

Выполнение этих требований наиболее просто можно осуществить посредством шунтирования выхода ИКТ последовательной резонансной цепью $L-C$, настроенной на частоту промышленного тока и включенной последовательно в цепь ДГК. Однако расчеты показывают, что в нормальном режиме работы сети при приемлемых параметрах цепи $L-C$ получается очень большой отсос контрольного тока в цепь $L-C$ (больше 60%).

Это явление неприемлемо при использовании в качестве реагирующего органа защиты фазочувствительного устройства, реагирующего на изменение фазы контрольного тока при замыкании, так как в нормальном режиме работы сети будет недостаточным торможение в реагирующем органе.

Данное обстоятельство выдвигает еще одно требование к ИКТ, заключающееся в том, что цепь $L-C$ должна вместе с другими элементами являться необходимой составной частью ИКТ и обеспечивать вместе с ними режим ИКТ.

Отмеченным требованиям удовлетворяют специально разработанные для защиты конструкции параметрических делителей частоты (ПДЧ). Ниже приводится описание принципа работы ПДЧ на основе схемы замещения, результаты испытаний и методика инженерного расчета.

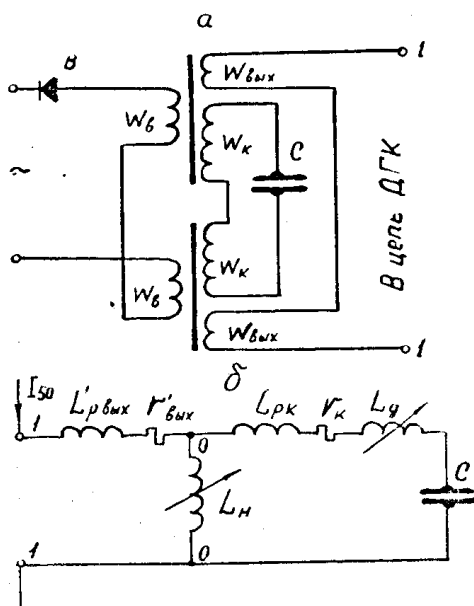


Рис. 1.

На рис. 1 а приведена схема обычной конструкции ПДЧ. ПДЧ обычной конструкции состоит из двух ферромагнитных сердечников с намотанными на них обмотками возбуждения $W_в$, контурными обмотками W_k и выходными обмотками $W_{вых}$. Обмотки $W_в$ питаются от источника синусоидального напряжения 50 гц через полупроводниковый вентиль В. Они соединяются встречно-последовательно по отношению к контурным обмоткам, которые соединены последовательно и замкнуты на конденсатор С. Индуктивность контурных обмоток вместе с конденсатором С образует колебательный контур, настроенный на частоту, близкую к 25 гц. Выходные обмотки соединяются согласно с контурными. Зажимами 1-1 ПДЧ включается в цепь ДГК. На рис. 1 б приведена схема замещения ПДЧ со стороны выходных обмоток. Эта схема со стороны выходных обмоток представляет собой обычную

схему замещения трансформатора с емкостной нагрузкой С, индуктивность ветви намагничивания которого является периодически изменяющейся во времени (L_n). Остальные обозначения на схеме:

$L'_{р\text{вых}}$ и $r'_{\text{вых}}$ — индуктивность рассеяния и активное сопротивление выходных обмоток, приведенные к числу витков контурной обмотки;

$L_{рк}$ и r_k — индуктивность рассеяния контурной обмотки и активное сопротивление колебательного контура;

L_d — дополнительная индуктивность.

Дополнительная индуктивность должна быть выбрана такой, чтобы вместе с индуктивностью $L_{рк}$ и конденсатором С образовать последовательную резонансную цепь на частоте промышленного тока. Тогда входное сопротивление ПДЧ для тока дугогасящей катушки будет определяться небольшой геометрической суммой сопротивлений $x'_{р\text{вых}}$ и r_k . Одновременно в таком случае ответвление тока 50 гц в ветвь намагничивания ПДЧ будет минимальным. Таким образом, включение дополнительной индуктивности устраняет влияние ПДЧ на ток дугогасящей катушки и влияние этого тока на электромагнитные процессы в ПДЧ, обеспечивающие деление частоты.

Включение дополнительной индуктивности L_n принципиально не

изменяет режим работы ПДЧ. Покажем это. При полной резонансной настройке на частоте 50 гц цепи $(L_{pk} + L_d) \rightarrow C$ относительно точек О—О можно составить два уравнения на частотах 50 и 25 гц:

$$\begin{cases} \omega(L_{pk} + L_d) = 1/\omega C, \\ 2/\omega C - \omega/2(L_{pk} + L_d) = -\frac{2}{\omega C}, \end{cases} \quad (1)$$

где

ω — частота промышленного тока;
 C_3 — некоторая эквивалентная емкость, подключенная к ветви намагничивания и соответствующая сопротивлению емкостного характера, на частоте 25 гц при включении L_d .

Из (1)

$$C_3 = 4/3 C. \quad (2)$$

Включение L_d увеличивает эквивалентную емкость колебательного контура. Для получения режима ПДЧ, предшествующего включению L_d , необходимо емкость конденсатора C уменьшить в $4/3$ раз.

Таким образом, описанная схема ПДЧ полностью удовлетворяет требованиям к ИКТ для защиты компенсированных сетей от замыканий на землю.

Схема замещения специально разработанных конструкций ПДЧ принципиально не отличается от приведенной на рис. 1б. Отличие этих конструкций от обычной состоит в том, что за счет рационального расположения ферромагнитных сердечников и размещения обмоток на них значительно уменьшен расход проводникового материала (приблизительно в 2 раза), а дополнительная индуктивность обеспечивается за счет увеличенного рассеяния обмотки колебательного контура, причем индуктивность рассеяния может регулироваться.

Работа ПДЧ в качестве ИКТ компенсированных сетей отличается от работы силового ПДЧ. Это отличие состоит в том, что в нормальном режиме работы сети ПДЧ нагружен на сумму сопротивлений нулевой последовательности и дугогасящей катушки, имеющей на частоте 25 гц емкостный характер, а при замыкании на землю — на индуктивное сопротивление ДГК. Соотношение этих сопротивлений на частоте 25 гц при полной компенсации емкостных токов сети равно 3:1. Кроме того, известно, что при работе ПДЧ на емкостную нагрузку напряжение на его выходе несколько повышается в зависимости от режима насыщения сердечников (при меньшем насыщении — больше). Поэтому рассматривая ПДЧ как ИКТ, необходимо, прежде всего, знать его внешние характеристики при работе на индуктивную нагрузку.

На рис. 2а и б приведены зависимости в относительных единицах $U_{вых*}^{(L)}(S_*)$ и $U_{вых}^{(L)}(I_{25*})$ при работе на индуктивную нагрузку, где

$U_{вых*}^{(L)}$ — напряжение на выходе ПДЧ,

S_* — отдаваемая мощность,

I_{25*} — ток в индуктивной нагрузке.

За базисные величины приняты: напряжение на выходе ПДЧ на холостом ходу $U_{выхх}$, полная мощность колебательного контура на холостом ходу S_k . За базисную величину тока принят ток, соответствующий максимальной отдаваемой мощности S_{max*} .

На рис. 2 приведена также зависимость $I_{25*}(S_*)$.

Рассматривая зависимости рис. 2, можно заключить:

1. Максимальная отдаваемая мощность ПДЧ S_{max*} значительно

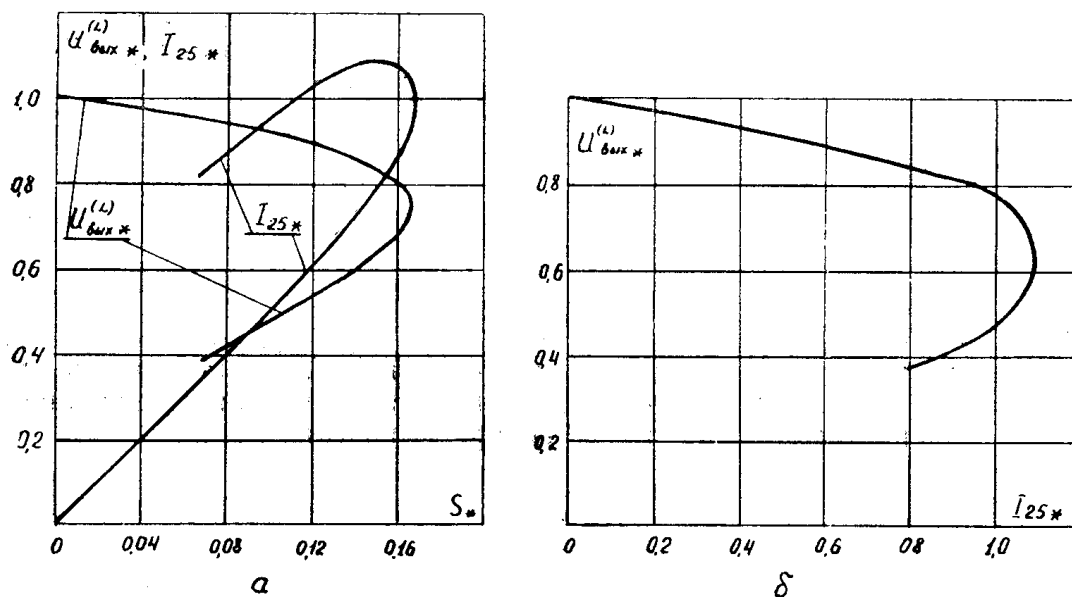


Рис. 2

меньше мощности, циркулирующей в колебательном контуре.

2. Известной жесткости внешних характеристик параметрических генераторов при работе на активную нагрузку не наблюдается. Характеристики при работе на индуктивную нагрузку обладают значительным коэффициентом статизма.

3. Характеристики могут быть разбиты на две части: I часть — от холостого хода до максимальной отдаваемой мощности — рабочая часть, II часть — от максимальной мощности и далее в область меньших индуктивных сопротивлений — нерабочая часть.

При работе ПДЧ на нерабочей части внешних характеристик он обладает неустойчивостью, заключающейся в том, что при исчезновении и повторном восстановлении напряжения возбуждения процессы деления частоты не восстанавливаются. Кроме того, при работе на этой части характеристик выходное напряжение ПДЧ много меньше напряжения на холостом ходу.

Учитывая эти обстоятельства, работа ПДЧ в качестве ИКТ для защиты может быть допущена только на рабочей части характеристик.

Согласно проведенным экспериментальным исследованиям отдаваемая мощность должна приниматься не выше 0,9 от максимальной отдаваемой мощности. Этот коэффициент обозначим через k_y и назовем коэффициентом устойчивости параметрических колебаний при исчезновении и повторном восстановлении напряжения возбуждения.

Большой интерес при использовании ПДЧ в качестве ИКТ для защиты компенсированных сетей представляют зависимости выходного напряжения и тока 25 гц, протекающего по индуктивному сопротивлению, на которое нагружен ПДЧ от тока 50 гц, пропускаемого по выходным обмоткам ПДЧ.

Именно в таких условиях работает ПДЧ при замыкании на землю в компенсированной сети.

На рис. 3а и б представлены зависимости в относительных единицах $U^{(L)}_{вых*}$ (I_{50*}) и I_{25*} (I_{50*}). За базисную величину тока 50 гц принят ток дугогасящей катушки Братской ГЭС, приведенный к параметрам испытываемой модели ПДЧ. Цифры над кривыми означают величину коэффициента устойчивости k_y . Кривые, показанные на рис. 3а и б, позволяют заключить, что зависимости $U^{(L)}_{вых*}$ (I_{50*}) и I_{25*} (I_{50*}), характеризующие устойчивость колебаний 25 гц при про-

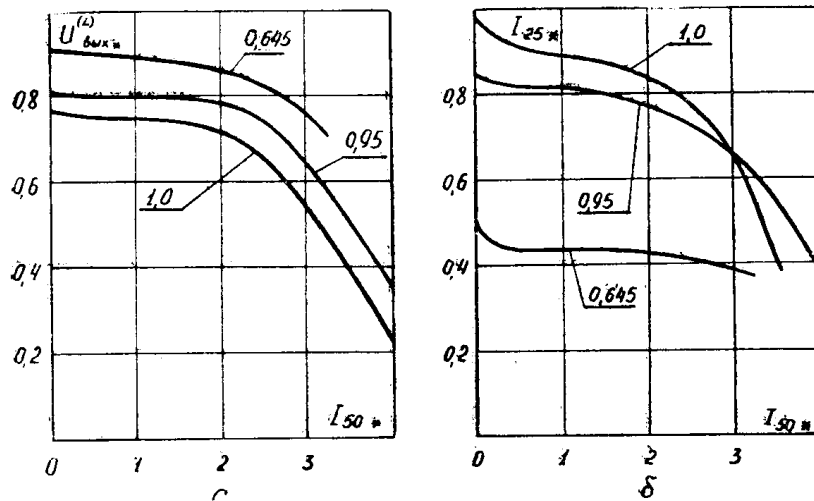


Рис. 3

течении через ПДЧ тока 50 гц, обладают достаточной жесткостью в пределах до $I_{50*}=2$. Это достигнуто благодаря включению в цепь колебательного контура дополнительной индуктивности L_d . При отсутствии в схеме ПДЧ L_d колебания 25 гц практически пропадают при $I_{50*} < 0,5$.

Построенные зависимости позволяют по принятой отдаваемой мощности ПДЧ на индуктивную нагрузку рассчитать необходимую мощность, циркулирующую в колебательном контуре на холостом ходу, а по ней рассчитать требуемые параметры ПДЧ.

Таким образом, расчет ПДЧ следует начинать с определения отдаваемой мощности.

1. В общем случае отдаваемая мощность ПДЧ должна быть рассчитана исходя из двух условий: 1) требуемого контрольного тока при замыкании на землю в сети I_{L25} ; 2) требуемого контрольного тока в нормальном режиме работы сети I_{C25} .

$$S_L = U_{вых*}^{(L)} \cdot U_{вых\text{ хх}} I_{L25}, \quad (3)$$

$$S_C = U_{вых*}^{(C)} \cdot U_{вых\text{ хх}} I_{C25}, \quad (4)$$

где $U_{вых\text{ хх}}$ — выходное напряжение в вольтах на холостом ходу;

S_L — отдаваемая мощность в ва при замыкании в сети;

S_C — отдаваемая мощность в ва в нормальном режиме работы сети;

$U_{вых*}^{(L)}$ — выходное напряжение в относительных единицах при работе ПДЧ на индуктивную нагрузку;

$U_{вых*}^{(C)}$ — выходное напряжение в относительных единицах при работе ПДЧ на емкостное сопротивление.

Мощности S_L и S_C могут быть также определены из выражений:

$$S_L = I_{L25}^2 \cdot X_L, \quad (5)$$

$$S_C = I_{C25}^2 \cdot X_C, \quad (6)$$

где X_L — сопротивление дугогасящей катушки на частоте 25 гц;

X_C — сумма сопротивлений нулевой последовательности сети и ДГК на частоте 25 гц.

Как ранее отмечалось, X_C носит емкостный характер и при полной компенсации емкостного тока сети $X_C = 3X_L$. Принимая это во внимание, определим отдаваемую мощность ПДЧ при замыкании в сети S'_L если задана отдаваемая мощность S_C в нормальном режиме работы

сети. Для этого произведем преобразования. Из (4) $U_{\text{ВЫХ ХХ}} = S_{\text{с}} / U_{\text{ВЫХ}*}^{\text{с}} \cdot I_{\text{с}25}$. По закону Ома $I_{\text{Л}25} = U_{\text{ВЫХ}*}^{\text{Л}} \cdot U_{\text{ВЫХ ХХ}} / X_{\text{Л}} ; I_{\text{с}25} = U_{\text{ВЫХ}*}^{\text{с}} \cdot U_{\text{ВЫХ ХХ}} / 3X_{\text{Л}}$. Подставляя полученные формулы в (2), получим

$$S'_{\text{Л}} = 3 \frac{U_{\text{ВЫХ}*}^{\text{Л}2}}{U_{\text{ВЫХ}*}^{\text{с}2}} S_{\text{с}}. \quad (7)$$

В (7) $S_{\text{с}}$ определяется по (6), $U_{\text{ВЫХ}*}^{\text{Л}} = U_{\text{ВЫХ}*}^{\text{Л}} (k_{\text{у}} S_{\text{макс}*})$ по зависимости на рис. 2, а. $U_{\text{ВЫХ}*}^{\text{с}}$ должна определяться в общем случае по зависимости $U_{\text{ВЫХ}*}^{\text{с}} (S_{*})$. Однако принимая во внимание (7), а также, как отмечалось ранее, возрастающий характер этой зависимости с увеличением S_{*} , можно принимать $U_{\text{ВЫХ}*}^{\text{с}} = 1$, что пойдет в запас устойчивости работы ПДЧ на индуктивную нагрузку при исчезновении и повторном восстановлении напряжения возбуждения.

Таким образом, отдаваемая мощность ПДЧ при задании контрольных токов в нормальном режиме работы сети и при замыкании должна определяться из выражений (5) и (7). Большая величина должна быть принята за расчетную отдаваемую мощность $S_{\text{расч}}$.

2. Мощность, циркулирующая в колебательном контуре, равна

$$S_{\text{к}} = \frac{S_{\text{расч}}}{k_{\text{у}} S_{\text{макс}*}}. \quad (8)$$

3. Задаемся емкостью конденсатора ПДЧ C и определяем эквивалентную емкость $C_{\text{э}}$ по (2).

4. Определяются сопротивления $C_{\text{э}}$ и C на частоте 25 гц $X_{\text{сэ}}^{(25)}$, $X_{\text{с}}^{(50)}$, а также сопротивление C на частоте 50 гц $X_{\text{с}}^{(50)}$.

5. Ток в колебательном контуре

$$I_{\text{к}25} = \sqrt{\frac{S_{\text{к}}}{X_{\text{сэ}}^{(25)}}}. \quad (9)$$

6. Напряжение с частотой 25 гц на ветви намагничивания

$$U_{\text{к}25} = \frac{S_{\text{к}}}{I_{\text{к}25}}. \quad (10)$$

7. Коэффициент трансформации между контурной и выходной обмотками:

$$k_{\text{т}} = \frac{U_{\text{к}25}}{U_{\text{ВЫХ ХХ}}}, \quad (11)$$

где

$$U_{\text{ВЫХ ХХ}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}^{\text{Л}}}{U_{\text{ВЫХ}*}^{\text{Л}} (k_{\text{у}} \cdot S_{\text{макс}*})}; \quad (12)$$

$U_{\text{ВЫХ}*}^{\text{Л}} (k_{\text{у}} S_{\text{макс}*})$ определяется по $U_{\text{ВЫХ}*}^{\text{Л}} (S_{*})$,

$$U_{\text{ВЫХ}}^{\text{Л}} = S_{\text{расч}} / I_{\text{Л}25 \text{ расч}}. \quad (13)$$

В (13) $I_{\text{Л}25 \text{ расч}} = I_{\text{Л}25}$ при $S_{\text{расч}} = S_{\text{Л}}$. При $S_{\text{расч}} = S'_{\text{Л}}$

$$I_{\text{Л}25 \text{ расч}} = \sqrt{\frac{S'_{\text{Л}}}{X_{\text{Л}}}}. \quad (14)$$

8. Определяется ток 50 гц, протекающий в колебательном контуре при условии, что общая индуктивность рассеяния и емкость C настроены в резонанс на частоте 50 гц:

$$I_{\text{к}50} = \frac{I_{\text{дгк}}}{k_{\text{т}}}, \quad (15)$$

где $I_{\text{дгк}}$ — ток дугогасящей катушки.

9. Определяется амплитуда максимального напряжения на конденсаторе:

$$U_{mc} = \sqrt{2} [I_{K50} X_c^{(50)} + I_{K25} X_c^{(25)}]. \quad (16)$$

10. Задается средняя силовая линия сердечников ПДЧ и производится расчет активного сечения ферромагнитного материала и чисел витков, контурных и выходных обмоток. В основу расчета положены три формулы:

$$L_{срн} = \mu_{ср} W_K^2 q / l_{ср}; \quad (17)$$

$$q = \frac{2U_{K25}}{\omega W_K B_{25}}; \quad (18)$$

$$\omega / 2 L_{срн} = \frac{2}{\omega C_3}, \quad (19)$$

где

$L_{срн}$ — средняя индуктивность ветви намагничивания ПДЧ;

$\mu_{ср}$ — средняя магнитная проницаемость ферромагнитного материала при работе ПДЧ на холостом ходу;

q — суммарное активное сечение обоих сердечников;

$l_{ср}$ — средняя силовая линия сердечников;

B_{25} — действующее значение индукции с частотой 25 гц;

W_K — число витков контурных обмоток;

ω — частота промышленного тока.

Из (19) определяется

$$L_{срн} = 4 / \omega^2 C_3. \quad (20)$$

Подставляя (18) и (20) в (17) и произведя преобразования, получим

$$W_K = \frac{2l_{ср} B_{25}}{\omega C_3 \mu_{ср} U_{K25}}. \quad (21)$$

Величина $\mu_{ср}$ и B_{25} в (21) определяются эмпирическим путем посредством расчета их по выражениям (17) и (18) для находящихся в эксплуатации ПДЧ. Для ПДЧ, выполненных из стали Э310, на рис. 4 дана зависимость B_{25} ($\mu_{ср}$). Наклон кривой зависит от марки стали и качества технологии изготовления сердечников.

С улучшением качества изготовления сердечников наклон кривой уменьшается.

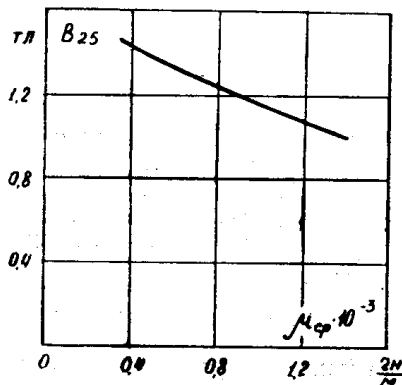


Рис. 4.

Для расчетов ПДЧ со сталью Э310 можно рекомендовать B_{25} в пределах $1,1 \div 1,3$ тл.

После определения W_k определяется суммарное активное сечение по (18) и число витков выходных обмоток:

$$W_{\text{вых}} = \frac{W_k}{k_T}. \quad (22)$$

11. Определяется число витков обмоток возбуждения. Из-за сложности вывода даем конечные формулы:

$$B_H = \left[\frac{\omega^{2/4} \cdot q W_k^2 k^{\mu^{1/k}} \sqrt{\pi} C_3 \Gamma \left(\frac{1}{2k} + 0,5 \right)}{I_{\text{ср}} \Gamma \left(\frac{1}{2k} \right)} \right]^{\frac{k}{1-k}}; \quad (23)$$

$$W_B = \frac{2 U_m}{q \omega B_H} \cdot \left(\frac{1,1 B_f}{B_H} \right)^8, \quad (24)$$

где

B_H — амплитуда индукции на грани возбуждения ПДЧ;

k и μ — коэффициенты степенной аппроксимации кривой намагничивания сердечника $\beta = \mu H_k$;

Γ — гамма-функция;

U_m — амплитуда напряжения возбуждения,

B_f — значение индукции в нижней точке пересечения кривой намагничивания с ее степенной аппроксимацией.

Коэффициенты μ и k определяются методом выбранных точек на основной кривой намагничивания.

Использование (23), (24) дает заниженное количество витков обмоток возбуждения на $15 \div 30\%$.

По описанной методике рассчитано несколько вариантов ПДЧ для защиты от замыканий на землю гидрогенераторов Братской ГЭС. По одному из вариантов изготовлен ПДЧ. Испытания показали хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных.

Выводы

1. На основании схемы замещения проанализированы режимы работы ПДЧ при использовании его в качестве ИКТ для защиты компенсированных сетей от замыкания на землю.

2. Предложена схема ПДЧ, позволяющая использовать его в условиях ИКТ.

3. Разработаны конструкции ПДЧ с уменьшенным расходом проводникового материала.

4. Предложена методика инженерного расчета ПДЧ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сигнализация замыканий на землю в компенсированных сетях. Сборник статей под редакцией инж. В. И. Иоэльсона, ГЭИ, 1962.

2. Р. А. Вайнштейн, А. В. Шмойлов. Применение низкочастотного индуктивного параметрона без подмагничивания постоянным током в защитах от замыкания на землю в сетях с компенсированной и изолированной нейтралью. Известия ТПИ, т. 152, 1966.

3. Р. А. Вайнштейн. Применение низкочастотных параметрических систем для защиты от замыканий на землю компенсированных сетей. Диссертация, г. Томск, 1965.

4. Р. А. Вайнштейн. Авторские свидетельства №№ 177958, 178862.