

ОБ АППРОКСИМАЦИИ ХАРАКТЕРИСТИК НАМАГНИЧИВАНИЯ КУСОЧНЫМИ ФУНКЦИЯМИ ПРИ РАСЧЕТЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ С ФЕРРОМАГНЕТИКАМИ

Докт. техн. наук, проф. НОВАШ В. И., студ. ТОМКЕВИЧ А. П.

Белорусский национальный технический университет

Математические модели, предназначенные для расчета процессов в электрических цепях с ферромагнитными элементами, состояются с использованием различных способов аппроксимации характеристик намагничивания. От качества аппроксимации зависят достоверность и точность результатов расчета, причем в ряде случаев эта зависимость является определяющей. Так, форма кривой и величина тока холостого хода (ток намагничивания), броски этого тока при включении силового трансформатора в значительной степени определяются геометрическими размерами и характеристиками магнитопровода. Погрешности измерительных трансформаторов тока (ТТ) и зависящие от них токи небаланса в схемах дифференциальных защит также полностью определяются токами намагничивания ТТ и, следовательно, характеристиками намагничивания их магнитопроводов.

В настоящей статье рассматривается влияние способа аппроксимации характеристик намагничивания кусочными функциями на результаты моделирования режимов включения силовых трансформаторов. Расчеты мгновенных значений электрических и магнитных величин в переходных режимах ведутся с использованием средней кривой намагничивания [1] – средняя линия частной петли гистерезиса с максимальными и минимальными предельными значениями индукции в исследуемом режиме. При расчете электромагнитных устройств, работающих в режимах глубокого насыщения, средняя кривая намагничивания в области малых индукций – прямая, проходящая через начало координат, которая при $\mu \geq \mu_{\max}$ совпадает с основной кривой намагничивания. Для достаточно точной аппроксимации характеристик во всем диапазоне возможных значений индукции и напряженности пока не удается [2, 3] подобрать единые математические зависимости, обеспечивающие совпадение аппроксимированных и исходных характеристик.

Аппроксимация полными полиномами высоких степеней, обеспечивающая совпадение характеристик в заданных точках, а также использование ряда Фурье не получили распространения вследствие «волнистости» графиков аппроксимирующих зависимостей, что не соответствует физической природе исходных характеристик. Аппроксимация кубическими сплайнами не свободна от этого недостатка. Широко используется кусочно-линейная аппроксимация ломаной линией, состоящей из двух-трех отрезков. В аналитических исследованиях бросков тока намагничивания силовых трансформаторов, расчетах погрешностей измерительных ТТ применяются прямоугольная характеристика намагничивания (ПХН)

$B = f(H)$ и спрямленная характеристика намагничивания (СХН). Достоинством использования ПХН и СХН является возможность получения относительно простого аналитического решения уравнений математической модели в общем виде.

Численные расчеты на ПЭВМ выполняются с использованием характеристик намагничивания в виде $H = f(B)$. Режим включения ненагруженного трехфазного трехстержневого трансформатора с цилиндрическими обмотками и схемой соединения обмоток $Y_0/\Delta-11$ (рис. 1) описывается уравнениями, не содержащими индуктивностей рассеяния отдельных обмоток [4].

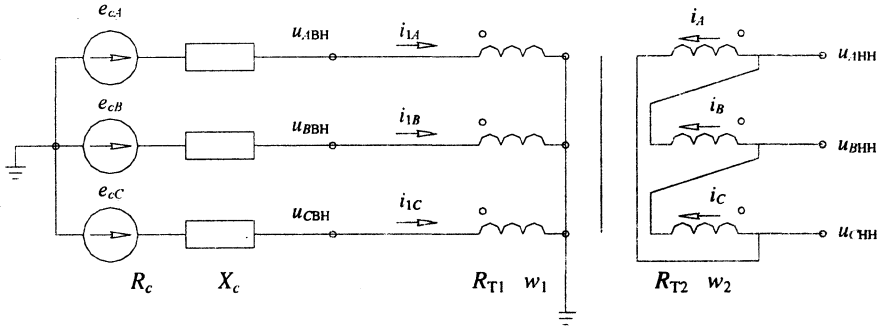


Рис. 1

Приведем дифференциальные уравнения равновесия ЭДС питающей системы и падений напряжений в электрических контурах обмоток высокого напряжения (наружные обмотки)

$$e_{cj} = (R_c + R_{T1})i_{1j} + \frac{d}{dt}(L_c i_{1j} + w_1 S_c B_j - w_1 \Phi_{kj}), \quad j = A, B, C. \quad (1)$$

Дифференциальное уравнение вторичных обмоток (внутренние обмотки) имеет вид

$$w_2 S_c \frac{d}{dt}(B_A + B_B + B_C) + 3R_{T2}i_0 = 0, \quad (2)$$

$$i_0 = i_A = i_B = i_C.$$

Здесь B_A, B_B, B_C – индукции в стержнях магнитопровода; $\Phi_{кА}, \Phi_{кВ}, \Phi_{кС}$ – магнитные потоки в междуобмоточных пространствах.

Алгебраические уравнения равновесия МДС в контурах магнитопровода:

$$w_1 i_{1j} + w_2 i_0 = l_c H_j + R_{\mu 0} \Phi_{0j};$$

$$w_2 i_0 = l_c H_j + R_{\mu к} \Phi_{kj};$$

$$R_{\mu 0} \Phi_{0A} - R_{\mu 0} \Phi_{0B} - l_{я} H_{яA} = 0; \quad (3)$$

$$R_{\mu 0} \Phi_{0C} - R_{\mu 0} \Phi_{0B} - l_{я} H_{яC} = 0.$$

Здесь Φ_{0A} , Φ_{0B} , Φ_{0C} – магнитные потоки, замыкающиеся через стенки бака и околообмоточное пространство; H_j , $H_{яA}$, $H_{яC}$ – напряженности магнитного поля в стержнях и элементах ярма магнитопровода; $R_{\mu k} = \frac{\omega_0 w_1^2}{X_{k1}}$,

$$R_{\mu 0} = \frac{3\omega_0 w_1^2}{X_{\mu 01}} - \text{магнитные сопротивления на путях потоков } \Phi_{kj}, \Phi_{0j};$$

X_{k1} , $X_{\mu 01}$ – реактивности короткого замыкания, намагничивания нулевой последовательности, приведенные к числу витков w_1 .

Уравнения (1)–(3) совместно с характеристиками намагничивания элементов магнитопровода $H_j = f(B_j)$; $H_{яk} = f(B_{яk})$ ($j = A, B, C$; $k = A, C$) для режима включения решаются относительно токов i_{lj} при нулевых начальных условиях или при начальных значениях индукций, равных остаточным индукциям предшествующего режима. Кусочно-линейная аппроксимация характеристик намагничивания в виде ПХН и СХН приводит к удовлетворительным результатам в отношении максимальных величин и формы кривой токов включения ненагруженного трансформатора при напряжениях системы, близких к номинальному. Максимальные значения токов включения отличаются от имеющихся в литературных источниках не более чем на 5...10 %. Такие же данные имеются в отношении погрешностей измерительных ТТ [5].

Что касается бросков тока намагничивания при других коммутационных режимах, и, вообще, для повышения достоверности моделирования, необходимо лучшее приближение результатов аппроксимации к исходным характеристикам намагничивания. В [6] аппроксимация в области сильной зависимости H от B ($\mu \geq \mu_{\max}$) производится кусочными функциями вида

$$H = a_{1i} B + a_{2i} B^{n_i} \quad (4)$$

с обеспечением плавной стыковки (равенства первых производных $\frac{dH}{dB}$) в точках сопряжения отдельных участков характеристик. На рис. 2 приведены результаты расчета режима включения трансформатора ТМ-16000/110 при начальной фазе напряжения e_{cA} , равной нулю, и спрямленной характеристике намагничивания. Формы кривых токов совпадают с литературными данными.

Обратим внимание на форму кривой напряжения $u_{AB \text{ нн}}$, вычисленного согласно зависимости

$$u_{AB \text{ нн}} = u_{A \text{ нн}} - u_{B \text{ нн}} = -(R_{T2} i_0 + w_2 S_c \frac{dB_B}{dt}).$$

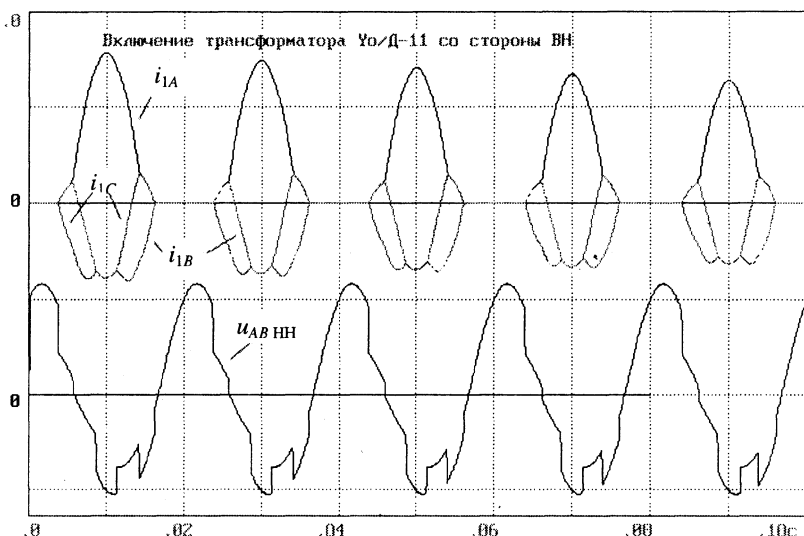


Рис. 2. Осциллограммы токов и напряжения при использовании СХН

Вырез ступенчатого характера на отрицательном полупериоде обусловлен, по нашему мнению, скачкообразным изменением производной $\frac{dH}{dB}$ спрямленной характеристики намагничивания. Результаты расчета с кусочно-параболической аппроксимацией [6], аппроксимацией гиперболическим синусом [2]

$$H = a \operatorname{sh}(bB) \quad (5)$$

и аппроксимацией в виде единого выражения

$$H = a_1 B + a_2 B^7 \quad (6)$$

подтверждают это предположение. При кусочно-параболической аппроксимации с равенством первой производной $\frac{dH}{dB}$ в точках сопряжения отдельных участков характеристики вырез на кривой напряжения $u_{AB \text{ НН}}$ сохраняется, но отличается более плавными переходами (рис. 3). В большей степени это проявляется (рис. 4) при использовании аппроксимации (5).

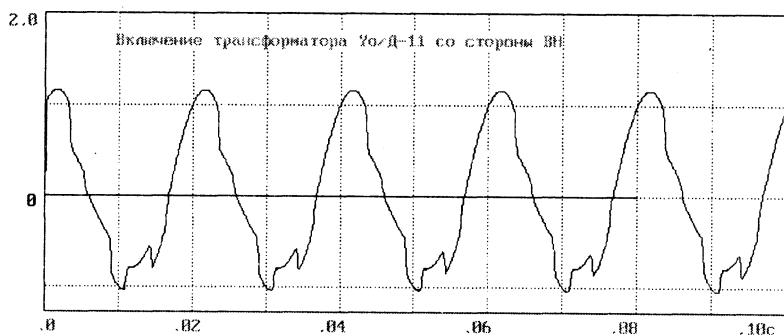


Рис. 3. Использование кусочно-параболической аппроксимации

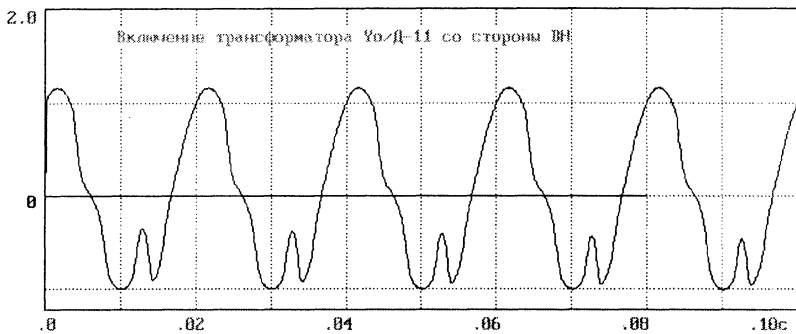


Рис. 4. Использование аппроксимации гиперболическим синусом

При аппроксимации характеристик намагничивания выражением (6) вырез на кривой напряжения u_{AB} нн проявляется в меньшей степени (рис. 5).

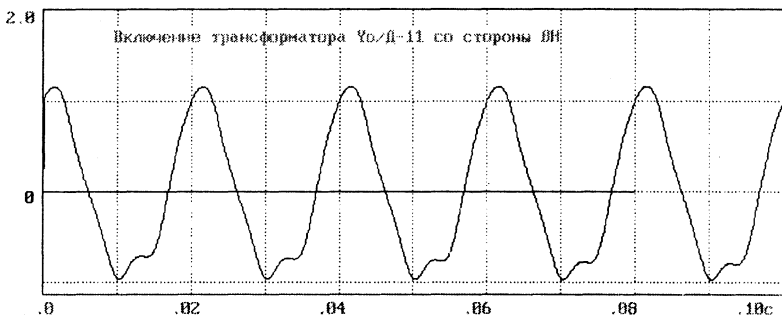


Рис. 5. Применение аппроксимации единым выражением (6)

Волнистость кривой напряжения в области этого выреза на рис. 2, 3 и 4 обусловлена влиянием токов соседних фаз на характер изменения индукции в стержне фазы B магнитопровода трансформатора или несоответствием характеристик (5), (6) оригинальной характеристике намагничивания. Основная кривая намагничивания вида $H = f(B)$ в области, близкой к полному насыщению ферромагнетика, имеет замедленное нарастание первой производной $\frac{dH}{dB}$, переходящее в $\frac{dH}{dB} = \text{const}$ (уменьшение до нуля второй производной $\frac{d^2H}{dB^2}$). Производная $\frac{dH}{dB}$ зависимостей (5), (6) с ростом индукции в области полного насыщения продолжает возрастать, что противоречит физике процессов насыщения ферромагнетика. Выяснение этих вопросов требует дальнейших исследований с другими видами аппроксимаций характеристик намагничивания.

ВЫВОД

Аппроксимация характеристик намагничивания кусочными функциями в задачах, содержащих в процессе решения вычисление производных, может приводить в существенным искажениям результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дроздов А. Д. Электрические цепи с ферромагнитными сердечниками в релейной защите. – М.; Л.: Энергия, 1965. – 240 с.
2. Соколов С. Е. Аппроксимация кривых намагничивания ферромагнитных устройств // Электричество. – 1991. – № 9. – С. 84–86.
3. Оганян Р. В. Аппроксимация кривой намагничивания стали квадратичной функцией // Электричество. – 1998. – № 4. – С. 70–73.
4. Новаш И. В. Математическая модель трехфазного трансформатора на базе второй теории рассеяния // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений). – 1986. – № 5. – С. 36–39.
5. Сопьяник В. Х., Жук Е. М. Расчет и анализ на ПЭВМ процессов в трансформаторах тока с учетом их характеристик намагничивания и вторичных нагрузок // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2001. – № 5. – С. 23–29.
6. Новаш В. И., Сопьяник В. Х. Расчет переходных процессов в токовых цепях многоплечевых дифференциальных защит // Электричество. – 1982. – № 7. – С. 74–76.

Представлена кафедрой
электрических станций

Поступила 1. 07.2002

УДК 621.313

АЛГОРИТМ ДЛЯ РЕЖИМНОЙ ОЦЕНКИ ПРОЕКТИРУЕМОЙ СХЕМЫ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С КОРРЕКЦИЕЙ УЗЛОВЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Инж. БАРО БАНДИЯ

Белорусский национальный технический университет

В настоящее время получить удовлетворительные результаты расчета режимов сложносвязанных электрических сетей электроэнергетических систем (ЭЭС) можно с помощью итерационных методов [1] путем решения системы нелинейных уравнений с использованием прямого и обратного хода исключения неизвестных [2]. Систему нелинейных уравнений состояния электрической сети, записанных в виде узловых уравнений в обращенной форме, можно свести к квадратичной матричной форме, которая позволит получить ускоренное приближенное потокораспределение.

Как известно, узловое уравнение в обращенной форме записывается в следующем виде [1]:

$$\underline{U}_{\Delta} = \underline{Z}\underline{I} + \underline{DE}, \quad (1)$$

где \underline{U}_{Δ} – вектор-столбец напряжений в узлах относительно базисного узла; \underline{Z} – матрица узловых (собственных и взаимных) сопротивлений; \underline{I} – вектор-столбец токов в узлах схемы сети; \underline{E} – то же ЭДС в ветвях сети; \underline{D} – матрица коэффициентов распределения напряжений.