

$\Delta Z$ , то условие устойчивости решения при сравнении I и II вариантов соответствует самому неблагоприятному вероятному исходу и определяется неравенством

$$Z_I - \Delta Z_I > Z_{II} + \Delta Z_{II} \quad (6)$$

После подстановки численных значений в условие (6) получаем

$$42,8 - 2,0 > 35,2 + 1,5$$

и убеждаемся в сохранении знака неравенства. Так как нижний возможный предел затрат  $Z_I$  превышает верхний возможный предел  $Z_{II}$ , то выбираем вариант электроснабжения напряжением 10 кВ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Румшинский Л. З. Математическая обработка результатов эксперимента. — М., 1971. — 192 с.
2. Керного В. В., Поспелов Г. Е., Федин В. Т. Местные электрические сети. — Минск, 1972. — 376 с.
3. Электротехнический справочник: В 3-х т. Т. 3. Кн. 2. Использование электрической энергии/Под ред. В. Г. Герасимова. 6-е изд. — М., 1982. — 560 с.
4. Синяк Ю. В. Оценка погрешности оптимального решения в задачах линейного программирования. — Экономика и математические методы, 1973, т. 9, № 1, с. 131–138.
5. Пиковский А. А., Таратин В. А. Техничко-экономические расчеты в энергетике в условиях неопределенности. — Л., 1981. — 196 с.

УДК 621.3.017:66 023/025

Н. Н. БОБКО, С. Н. ИВАНОВА, К. Г. СКАЧКО,  
канд. техн. наук

#### РАСЧЕТ НА ЭВМ ИНДУКТОРОВ ДЛЯ РЕАКТОРОВ

Задача расчета параметров индуктора сводится к расчету объемного электромагнитного поля в линейных и нелинейных кусочно-неоднородных средах, которую можно сформулировать, например, в виде системы интегральных уравнений. Решение такой системы представляет значительные трудности в вычислениях. Поэтому необходимо разрабатывать методы расчета с различными формами упрощения. В настоящей статье описана методика расчета параметров индуктора с учетом кривизны поверхности котла.

Воспользуемся системой уравнений Максвелла в общем виде:

$$\begin{cases} \operatorname{rot} \vec{H} = \frac{1}{\rho} \vec{E}; \\ \operatorname{rot} \vec{H} = -\mu \frac{dH}{dt}. \end{cases} \quad (1)$$

Представим напряженности  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  в символической форме и решим уравнения (1) относительно напряженности  $H$  для цилиндрической системы координат. Получим так называемое уравнение Бесселя нулевого порядка:

$$\frac{d^2 H}{dx^2} + \frac{1}{x} \cdot \frac{dH}{dx} - j \frac{1}{c^2} H = 0, \quad (2)$$

где  $x$  — расстояние от оси корпуса котла;  $\Delta = 50,3 \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}}$  — глубина проникновения поля в сталь;  $\rho$  — удельное электрическое сопротивление материала стенки котла;  $\mu$  — относительная магнитная проницаемость материала стенки котла;  $f$  — частота напряжения сети.

Решая уравнение (2) относительно  $H$ , получим

$$H_x = H_0 (F - jG), \quad (3)$$

где  $H_0$  — напряженность на поверхности стенки котла;  $F, G$  — функции, зависящие от размеров котла и материала, из которого изготовлены его стенки.

Для реакторов обычно  $D/\Delta > 10$ , где  $D$  — внешний диаметр.

Выражение (3) позволяет получить изменение напряженности магнитного поля  $H$  по мере проникновения электромагнитной волны вглубь стенки котла.

Магнитный поток, создаваемый обмоткой индуктора, представим в виде двух составляющих:

$$\Phi_0 = \Phi_q + \Phi_w.$$

Магнитный поток в воздушном зазоре  $\Phi_q = A_q H_0$ , где  $A_q$  — площадь поперечного сечения зазора. При наличии магнитных шунтов принимаем  $A_q = 0$ .

Поток  $\Phi_w$  в стенке котла получим, подставив выражение (3) в следующие соотношения:

$$\begin{cases} d\Phi_w = BdQ; \\ dQ = 2\pi x dx; \\ B = \mu H_x. \end{cases}$$

где  $dQ$  — элемент поперечного сечения стенки котла, через который проходит элементарный поток  $d\Phi$ . В результате

$$\Phi_w = \mu A_w H_0 (F - jG),$$

где  $A_w$  — эффективное поперечное сечение котла.

Полный поток, создаваемый индуктором,

$$\Phi_0 = H_0 [(A_q + \mu A_w F) - j\mu A_w G]. \quad (4)$$

Напряжение сети переменного тока, подведенное к зажимам индуктора, должно создать в обмотке индуктора ток, который обеспечил бы поток  $\Phi_0$ :

$$U = j\sqrt{2} \pi f w \Phi_0 \cdot 10^{-8}. \quad (5)$$

Будем считать индуктор коротким соленоидом, намагничивающая сила которого расходуется на проведение магнитного потока только в стенке котла. При наличии внешних ошихтованных магнитопроводов, охватывающих обмотку с наружной стороны, падением магнитного потенциала по внешним путям соленоида можно пренебречь. Таким образом,

$$H_0 h^* = 0,4 \cdot \pi w I, \quad (6)$$

где  $w$  – число витков индуктора;  $I$  – ток индуктора;  $h^*$  – активная высота зоны обогрева, находящаяся под индуктором и примерно соответствующая высоте самого индуктора.

Подставим (4) и (5), а также выразим ток из (6) и найдем выражение для мощности:

$$S = UI = 2,5 \cdot 10^{-8} f h^* H_0^2 [\mu A_w G + j(A_q + \mu A_w F)]. \quad (7)$$

Действительная часть этого выражения представляет собой активную мощность потерь в стенке котла, которая выделяется в виде тепла

$$P_w = 2,5 \cdot 10^{-8} f h^* H_0 \mu A_w G. \quad (8)$$

Мнимая часть выражения (7) соответствует реактивной мощности, потребляемой индуктором из сети и расходуемой на проведение магнитного потока по стальной стенке котла и воздушному зазору.

Чтобы рассчитать мощность по формуле (8), необходимо воспользоваться итерационным процессом, так как в правую часть этой формулы входят переменные  $H_0$  и  $\mu$ , являющиеся зависимыми одна от другой. Мощность тепловыделения известна из теплового расчета, и формула (8) используется для итерационного уточнения режима работы стали на кривой намагничивания. В результате определяются значения  $H$  и  $\mu$ . Напряженность  $H$  для первой итерации необходимо задать. В проведенных расчетах начальное приближение  $H$  для большинства вариантов принималось равным 40000 А/м.

Исходными данными, кроме начального приближения, являются: мощность  $P$ , выделяющаяся в стенке котла, размеры котла и индуктора, плотность тока в индукторе, удельная электропроводность стали и меди при заданных температурах стенки котла и обмотки, частота и напряжение сети.

Алгоритм расчета приведен на рис. 1.

В первой, итерационной, части алгоритма производятся следующие вычисления. По заданному или уточненному в результате итерации значению  $H$  рассчитываются индукция  $B$  и абсолютное значение магнитной проницаемости  $\mu$ , глубина проникновения поля в сталь  $\Delta$ , переменные  $F$  и  $A_w$  и мощность индуктора  $P$ .

В блоке 2 сравнивается отклонение  $\epsilon$  от заданного значения  $\epsilon_{\text{зад}}$ . Если полученное отклонение больше заданного, то осуществляется уточнение напряженности  $H$  (блок 3). Уточнение осуществляется путем умножения предыдущего значения  $H$  на отношение заданной мощности к рассчитанной. После этого управление передается в начало блока 1, где индукция вновь определяется по уточненному значению напряженности. Вычисления в блоке повторяются до тех пор, пока не будет удовлетворена заданная погрешность в определении  $P$ .

Когда рабочая точка на кривой намагничивания определена, то управление передается блоку 4, в котором последовательно вычисляются показатели: площадь поперечного сечения зазора  $A_q$ ; поток  $\Phi_0$ ; число витков  $w$ ; ток  $I$ ; сечение провода  $q$ ; сопротивление обмотки  $R_{\text{обм}}$ ; мощность, расходуемая в обмотке  $\Delta P$ ; суммарная мощность, потребляемая из сети  $P_{\Sigma}$ ; коэффициент мощности  $\cos \varphi$  и КПД  $\eta$ .

Для расчета кривая намагничивания разбивается на несколько участков. Текущие значения индукции на каждом участке находятся путем линейной интерполяции между соседними узловыми точками разбиения по формуле

$$B = B_{i-1} + \frac{B_i - B_{i-1}}{H_i - H_{i-1}} (H_i - H_{i-1}),$$

где текущее значение  $H$  лежит между  $i$ -м и  $i-1$ -м узлами разбиения, а  $B_i$ ,  $H_i$ ,  $B_{i-1}$ ,  $H_{i-1}$  — значения индукции и напряженности соответственно в  $i$ -м и  $i-1$ -м узлах разбиения. Узлы разбиения надо выбирать так, чтобы участки между ними незначительно отличались от прямой линии. Максимальное число узлов разбиения 16.

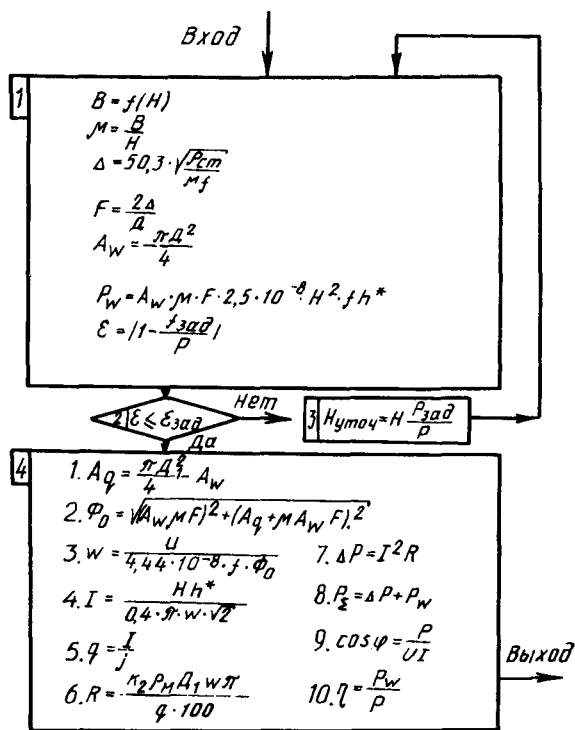


Рис. 1. Блок-схема алгоритма расчета.

Зависимость мощности от температуры продукта аппроксимировалась в интервале температур  $+20 - 300^\circ\text{C}$  по линейному закону

$$P_{(t)} = P_{300} (1,5 - 0,00168t).$$

Зависимость удельной электрической проводимости конструкционной стали Ст. 3 от температуры взята из [1]. Там же приведена зависимость

$\rho_M = f(t)$  для меди. Значения  $\rho_{ст}$  и  $\rho_M$  задаются по исходным данным в соответствии с температурами стенки котла и обмотки индуктора.

Приведенный выше алгоритм был реализован при помощи языка ФОРТРАН на ЭВМ "Минск-32".

Расчет применим для индукционных катушек любой конфигурации.

Результаты расчета индукторов не отличаются от экспериментальных данных более, чем на 10 %. Это вполне допустимо для цепей со сталью.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Физические свойства сталей и сплавов, применяемых в энергетике: Справочник/ Под ред. Б.Е.Неймарка. М.—Л., 1967. — 320 с.

УДК 621.315.1.072

Г.И.СЕЛИВЕРСТОВ (БПИ)

### ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ КОМПАКТНЫХ УПРАВЛЯЕМЫХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ 330—500 кВ

Пропускная способность традиционных электропередач 330—500 кВ удовлетворяет современному уровню развития электроэнергетических систем. Конструктивно новые одноцепные линии электропередачи компактного (кабельного) типа, предложенные в [1], при увеличении в фазе числа составляющих повышают пропускную способность за счет максимально возможного сближения проводов разноименных фаз и эффективного использования поверхности и сечения проводов. Другой путь увеличения пропускной способности заключается в выполнении двухцепных самокомпенсирующихся линий электропередачи с попарно сближенными фазами разных цепей и обеспечении между ними фазового сдвига до  $180^\circ$  [2].

Увеличение пропускной способности за счет максимального использования поверхности проводов достигается также в двухцепных линиях электропередачи, сочетающих положительные свойства компактных и самокомпенсирующихся ЛЭП [3]. В таких линиях провода попарно сближенных расщепленных фаз разных цепей равномерно и поочередно расположены на отдельном замкнутом контуре (рис. 1). Однако использование этих линий с напряжением 330 кВ и выше имеет ограничение по сечению применяемых проводов. Например, для ЛЭП 330 кВ радиус составяющего расщепленной фазы (рис. 1, б), удовлетворяющий ограничению коронного разряда, должен быть не менее 2 см, для ЛЭП 500 кВ — не менее 3 см. Поэтому в электропередаче данного типа необходимо применять расщепление каждого составляющего фазы на два и более проводов (рис. 1, в—е).

В данной статье мы попытались оценить возможности линии электропередачи с двойным расщеплением фаз, обуславливающей повышение пропускной способности (натуральной мощности) и оказывающей незначительное влияние на окружающую среду.

Наибольшая пропускная способность такой электропередачи достигается