

ΔZ , 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; ρ — удельное электрическое сопротивление материала стенки котла; μ — 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 Φ_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 Φ_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 ошхтованных 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 μ , 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 μ . 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 μ , глубина проникновения поля в сталь Δ , переменные F и A_w и мощность индуктора P .

В блоке 2 сравнивается отклонение ϵ 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 Φ_0 ; число витков w ; ток I ; сечение провода q ; сопротивление обмотки $R_{\text{обм}}$; мощность, расходуемая в обмотке ΔP ; суммарная мощность, потребляемая из сети P_{Σ} ; коэффициент мощности $\cos \varphi$ и КПД η .

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.

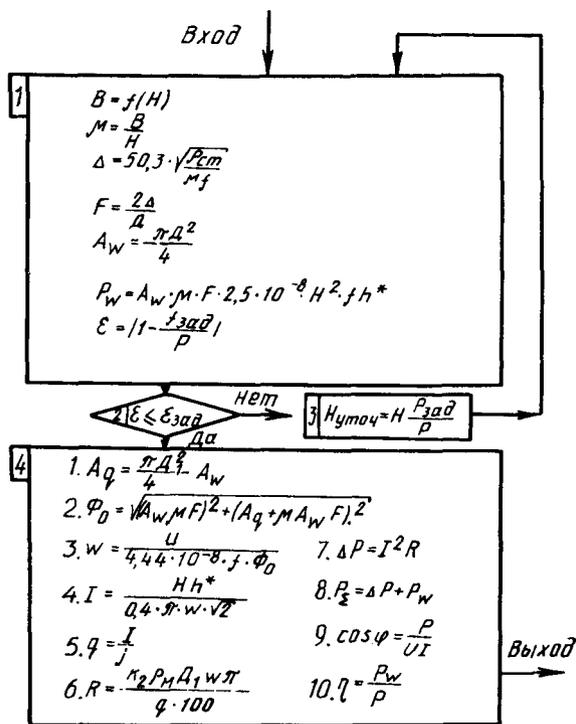


Рис. 1. Блок-схема алгоритма расчета.

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 ρ_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° [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 составляющего 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