

**Министерство образования и науки Российской Федерации
Государственное образовательное учреждение
высшего образования
«Тульский государственный университет»**

Институт высокоточных систем им. В.П. Грязева

Кафедра Электротехники и электрооборудования

**Методические указания к практическим занятиям
по дисциплине**

Электрические и электронные аппараты

Направление подготовки: *13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»*

Профиль подготовки : *Электрооборудование и электрохозяйства предприятий, организаций и учреждений*

Квалификация выпускника: *академический бакалавр*

Тула 2019 г.

Методические материалы составлены доц. Елецкой Г.П. утверждены на заседании кафедры электротехники и электрооборудования факультета систем автоматического управления, протокол № _____ от « ____ » _____ 20 г.
Зав. кафедрой _____

Методические материалы составлены доц. Елецкой Г.П. пересмотрены и утверждены на заседании кафедры электротехники и электрооборудования факультета автоматического управления, протокол № _____ от « ____ » _____ 20 г.
Зав. кафедрой _____

Методические материалы составлены доц. Елецкой Г.П. пересмотрены и утверждены на заседании кафедры электротехники и электрооборудования факультета автоматического управления, протокол № _____ от « ____ » _____ 200 г.

Содержание:

1. Введение. Общие требования к подготовке, проведению и подведению итогов (аттестация) цикла практических занятий
2. Занятие 1. Расчет магнитных цепей электромеханических аппаратов постоянного тока с учетом потоков рассеяния и выпучивания
3. Занятие 2. Расчет параметров электрических цепей электромеханических аппаратов постоянного тока
4. Занятие 3. Расчет статических характеристик электромеханических аппаратов постоянного тока
5. Занятие 4. Расчет динамических характеристик электромеханических аппаратов постоянного тока
6. Занятие 5. Анализ статических и динамических характеристик аппаратов

1. Введение. Общие требования к подготовке, проведению и подведению итогов (аттестация) цикла практических занятий.

Практические занятия проводятся в целях выработки практических умений и приобретения навыков в решении задач, производстве расчётов, характеристик электрических аппаратов, овладения методами их анализа. Главным их содержанием является практическая, исследовательская работа студента (исследовательские занятия). Их целью является углубленное изучение отдельных научно-практических проблем, с которыми может столкнуться будущий специалист. Студент при подготовке к практическим занятиям использует методические материалы учебного пособия [1]. Контроль подготовленности студентов к занятию осуществляется с помощью опроса или тестирования. В процессе занятия проводится самостоятельное решение задач при консультации преподавателя. Подведению итогов цикла практических занятий проводится в период аттестации и в конце семестра, балльная оценка соответствует результатам решения контрольных задач (тестов) и учитывается при промежуточной аттестации студента. При проведении каждого практического занятия используется следующий план .

План практического занятия:

1. Контроль подготовленности студентов к занятию
2. Самостоятельное решение задач при консультации преподавателя
3. Контроль выполнения задач

2. Занятие 1. Расчет магнитных цепей электромеханических аппаратов постоянного тока с учетом потоков рассеяния и выпучивания.

1. Цели и задачи практического занятия:

Получить навыки расчета магнитных цепей аппаратов с постоянной МДС.

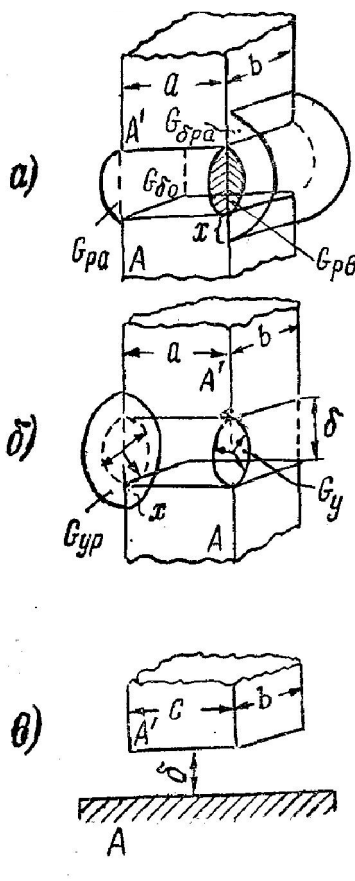
2. Основные теоретические положения

Для расчета характеристик электромагнитных аппаратов (ЭМА) необходимо знать значение всех параметров схем замещения его электрических и магнитных цепей. Важнейшими параметрами магнитных цепей являются сопротивления путей потоков рассеяния, которые могут быть определены на основе расчета магнитного поля электромагнитного аппарата.

Все известные методы расчета и исследования магнитных полей, могут быть подразделены на три группы: аналитические, графические и экспериментальные.

В силу трудностей математического характера аналитические методы позволяют решать только весьма небольшой круг задач. В тех случаях, когда расчёт картин поля аналитическими методами вызывает затруднения, прибегают к графическому методу построения картин поля или к исследованию поля на модели.

В практике расчёта и проектирования ЭМА широко применяется метод вероятных путей потоков рассеяния. В этом случае используются известные зависимости проводимостей стандартных фигур образуемых магнитным потоком.



G_{δ} - полная проводимость воздушного зазора

$$G_{\delta} = G_{\delta\delta} + 2G_{\delta a} + 2G_{\delta b} + 2G_{\delta a} + 2G_{\delta b} + 4G_{\delta} + 4G_{\delta}$$

$G_{\delta\delta} = \mu_0 \frac{S}{\delta}$ - полная проводимость

$G_{\delta a} = \mu_0 \cdot 0,28a$ - проводимость ребра „а“ (половина цилиндра)

$G_{\delta b} = \mu_0 \cdot 0,28b$ - проводимость ребра „б“

$G_{\delta a} = \mu_0 \frac{0,64a}{\delta + 1}$ - боковая проводимость ребра „а“ (полукольцо)

$G_{\delta} = \mu_0 \cdot 0,0775$ - проводимость угла стыка ребер (сферический квадрант);

$G_{\delta} = \mu_0 \cdot 0,25x$ - боковая проводимость линии стыка ребра (квадрант сферической оболочки)

В случае полюс-плоскость (в) ф-лы G_{δ} , $G_{\delta a}$, $G_{\delta b}$ и G_{δ} умножаются на 2.

Пример схемы замещения магнитной цепи с учетом потоков рассеяния и выпучивания приведен на рисунке 1.

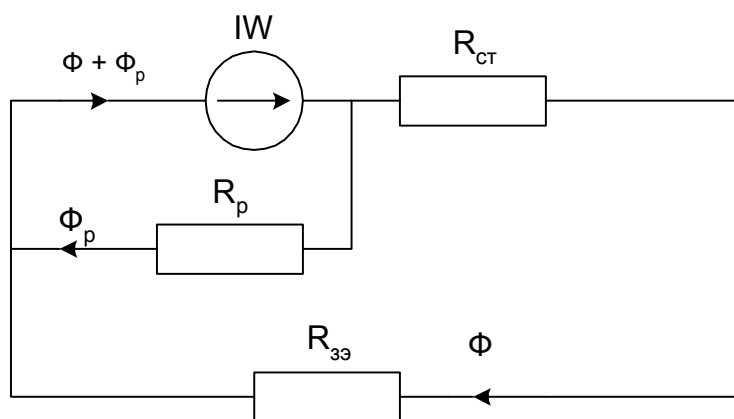


Рисунок 1. схема замещения

Где:

$$R_{CT} = R_{Я} + R_C$$

R_C - сопротивление статора магнитопровода

$R_{Я}$ - сопротивление якоря магнитопровода

$R_{зэ}$ - эквивалентное сопротивление зазора

$$R_{Я} = \frac{l_{Я}}{\mu_{Я} \cdot S_{Я}}$$

$$R_C = \frac{l_C}{\mu_C \cdot S_C}$$

Где μ_C и $\mu_{Я}$ взяты из условия $\mu = \mu_{\max}$

$$\frac{\mu_C}{\mu_0} = 1750 \quad \frac{\mu_{Я}}{\mu_0} = 4456$$

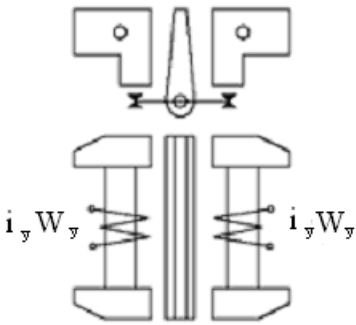
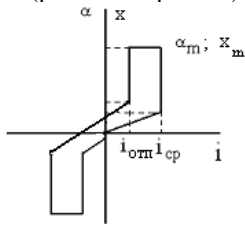
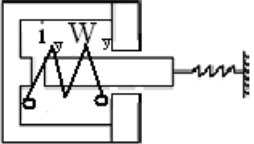
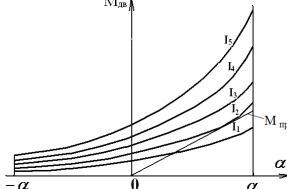
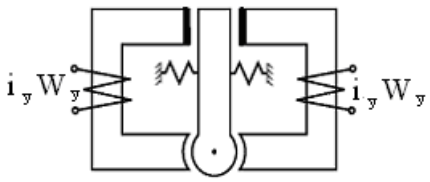
Перечень задач.

Задача 1. Составить схему замещения заданной конструкции электромагнита (таблица 1, вариант указывается преподавателем) с учетом потоков рассеяния и выпучивания.

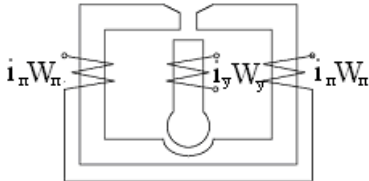
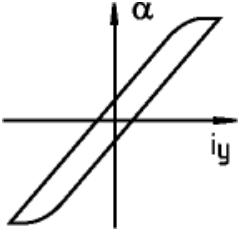
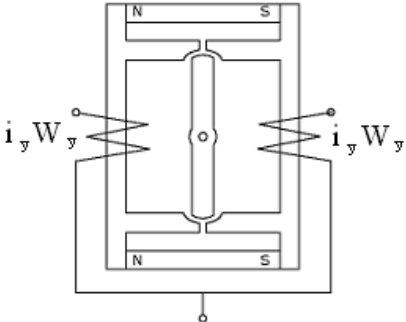
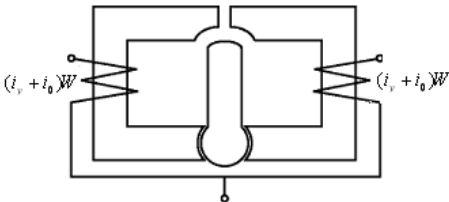
Задача 2. Определить проводимости и сопротивления потоков рассеяния и выпучивания.

Задача 3. Провести сравнительный анализ величин сопротивлений рабочих зазоров электромагнитов и сопротивления потоков рассеяния и выпучивания.

Таблица 1

Функциональное назначение	Конструктивные признаки		Признак значимости	Признак вида статической характеристики
	Тип	Конструктивная схема		
Исполнительные ЭМ электрических силовых систем управления	Поворотного типа с клиновым рабочим зазором (якорь между полюсами)	 $\alpha_{\max} = 4 \dots 15^\circ$	Нейтральные ЭН. Направление электромагнитного момента (силы) не зависит от знака тока управления.	Нелинейная характеристика (релейный режим)  ВН
Управляющие ЭМ пневматических и гидравлических силовых систем управления	Втяжного типа с поступательным движением якоря	 максимальный ход до 4 см б) фигурный стоп 		Внешняя характеристика Сигнал управления – импульсный, индукция в магнитопроводе изменяется в широких пределах: $B=0 \dots B_s$, проводимость рабочего зазора G_z – нелинейная функция угла α. При $i < i_{\text{опт}}$, заметно влияние гистерезиса.  (моментная характеристика)
	Поворотного типа с зазором, образованным плоскими поверхностями	а) якорь между полюсами  $\alpha_{\max} = 1,5 \dots 2,5^\circ$		

Функциональное назначение	Конструктивные признаки		Признак значимости	Признак вида статической характеристики
	Тип	Конструктивная схема		

Функциональное назначение	Конструктивные признаки		Признак знакочувствительности	Признак вида статической характеристики
	Тип	Конструктивная схема		
Управляющие ЭМ пневматических и гидравлических силовых систем Управления	Поворотного типа с зазором образованным плоскими поверхностями (а); концентрическими поверхностями (б, в)	а) с поляризацией специальными обмотками 	Поляризованные ЭМ. Знак определяется знаком тока управления $\alpha_{max} = 1,5 \dots 3^\circ$	Линейные характеристики (пропорциональный режим).  Сигнал управления гармонический. Магнитопровод не насыщается ($\mu_r = \text{const}$), G_3 - линейная функция угла α. Влияние гистерезиса незначительно
		б) с поляризацией постоянными магнитами 		
		в) с поляризацией начальными токами усилителя мощности i_0 		

3. Занятие 2 Расчет параметров электрических цепей электромеханических аппаратов постоянного тока

1. Цели и задачи практического занятия:

Получить навыки расчета и анализа индуктивностей обмоток аппаратов.

Основные теоретические положения

Основным параметром электрической обмотки аппарата определяющим быстродействие процессов в электрической цепи является индуктивность. Величина индуктивности определяется параметрами самой магнитной цепи аппарата и параметрами полей рассеяния электромагнитов. По данным таблицы 2 можно рассчитать индуктивность катушки (таблица 3)

Таблица 2

1. Без учета Φ_p	2. С учетом Φ_p
$\Phi = \frac{IW}{R_C + R_{\text{я}} + R_{\text{зэ}}}$	$\Phi_p = \frac{IW}{R_p}$
$G = \frac{1}{R_{\Sigma}} \quad R_{\Sigma} = R_C + R_{\text{я}} + R_{\text{зэ}}$	G_p - рассчитано в работе №4
$\psi = \Phi W$	$\psi = (\Phi + \Phi_p)W ; \quad \Phi = \frac{IW}{R_{\Sigma}}$
$\psi = \frac{IW^2}{R_{\Sigma}} = IW^2 G$	$\psi = IW^2 \left(\frac{1}{R_{\Sigma}} + \frac{1}{R_p} \right) = IW^2 (G + G_p)$

Таблица 3

1. Без учета Φ_p	2. с учетом Φ_p
при $\delta_3 = \text{const}$	при $\delta_3 = \text{const}$
$L = W^2 G \quad \psi_1 = W\Phi$	$L_2 = W^2 (G + G_p) \quad \psi_2 = W(\Phi + \Phi_p)$

Перечень задач:

Задача 1. Проанализировать функцию связи $\psi = f(i)$ заданной конструкции аппарата (таблица 1) для случая 1 и 2 таблицы 2.

Задача 2. Рассчитать индуктивность обмотки заданной конструкции аппарата (таблица 1) для случая 1 и 2 таблицы 3.

Задача 3. Составить дифференциальное уравнение обмотки провести анализ переходных процессов по току для указанных случаев 1 и 2 таблицы 3.

Задача 4. Провести анализ влияния учета Φ_p на скорость протекания переходных процессов в обмотках электрических аппаратов.

Методические указания

Схема замещения электрической цепи обмотки имеет вид рисунок 2

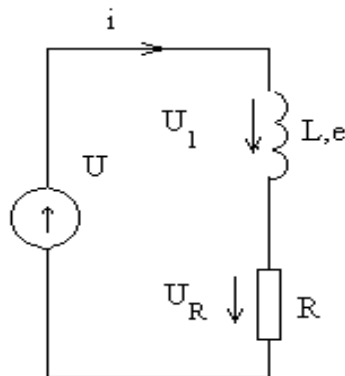


Рисунок 2

Согласно рисунку 2 уравнение обмотки по второму закону Кирхгофа имеет вид:

$$U + e = iR$$

$$\text{где: } e = -L \frac{di}{dt}$$

Тогда:

$$U = iR + L \frac{di}{dt}$$

$$T_{\text{э}} = \frac{L}{R} - \text{электрическая постоянная времени.}$$

$$i = \frac{U}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right)$$

Переходные процессы в обмотке для двух рассматриваемых случаев будут иметь вид рисунок 3

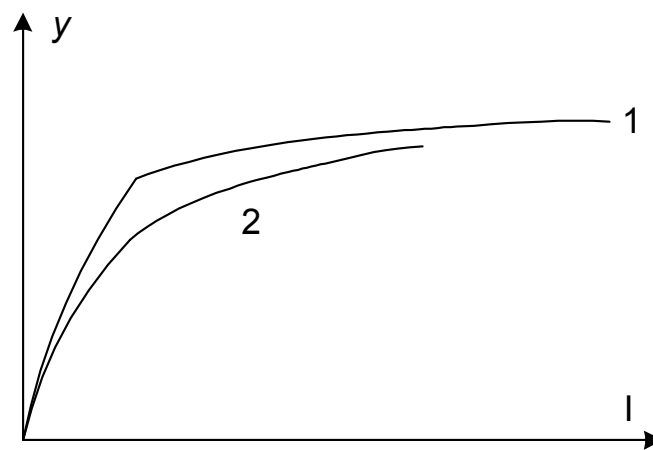


Рисунок 4. Переходные процессы в обмотке

На рисунке 4:

y – ток в обмотке, t – время

1 – L_1 – без учёта Φ_p

2 – L_2 -с учетом Φ_p

$L_1 = L$; $L_2 = L + L_p$

4. Занятие 3. Расчет статических характеристик электромеханических аппаратов постоянного тока

1. Цели и задачи практического занятия:

Освоить методики расчета статических характеристик электромеханических аппаратов постоянного тока

Основные теоретические положения

К основным статическим характеристикам относятся: уравнения связи $\psi = f(i, \alpha)$, внешняя характеристика $\alpha = f(i)$ и механическая характеристика $M_{эм} = f(i, \alpha)$. В качестве примера на занятиях рассмотрим расчет статических характеристик аппарата постоянного тока (нейтральный электромагнит(ЭМ)). Трудности расчета статических характеристик нейтрального ЭМ связаны в основном с необходимостью учета нелинейных кривых намагничивания $H = f(B)$ материалов магнитопровода. Кривая намагничивания материала магнитопровода задается таблично. Для ЭМ с неразветвленной магнитной цепью может быть получено достаточно простое выражение $M_{эм}$. Выбрав в качестве независимых переменных потокосцепления угол поворота якоря ЭМ, получим выражение для расчета $M_{эм}$, вычисляемого по запасенной энергии [1]:

$$M_{эм} = -\frac{\partial W_m}{\partial \alpha}; W_m = \int_0^{\psi_1} i_1(\psi_1, \alpha) d\psi_1.$$

Функция $i_1(\psi_1, \alpha)$ определяется по уравнению:

$$\left. \begin{aligned} iW &= \sum_{j=1}^n H_{яj} l_{яj} + \sum_{i=1}^m H_{ci} l_{ci} + \Phi_1 (R_{э1} + R_T); \\ H_{яj} &= f(\Phi_1); H_{ci} = f(\Phi_1); \Phi_1 = BS. \end{aligned} \right\}$$

Тогда

$$M_{эм} = -\frac{\Phi_1^2}{2} \frac{\partial R_{э2}}{\partial \alpha}.$$

Анализ приведенной зависимости показывает, что основу расчета статических характеристик нейтральных ЭМ составляет решение системы нелинейных алгебраических уравнений или в простейшем случае нелинейного алгеб-

раического уравнения. Для решения нелинейного алгебраического уравнения при расчете неразветвленной магнитной цепи может быть применен метод сканирования с дроблением шага. Поиск решений этого уравнения проиллюстрирован на рис.5

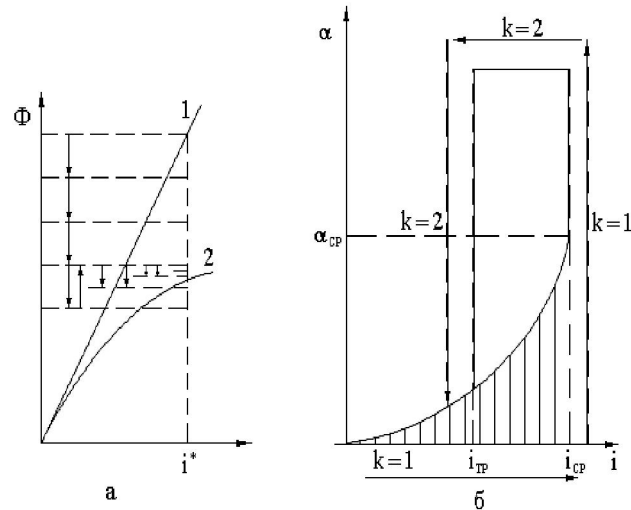


Рис. 5 Графическая иллюстрация алгоритмов расчета статических характеристик ЭМС с нейтральным ЭМ: а – функции потокоцепления, б – внешних характеристик (1 – функция $\Phi(i, \alpha); \mu_r = \infty$; 2 – функция $\Phi(i, \alpha), \mu_r = f(H)$)

Перечень задач:

Задача 1. Составить блок-схему расчета статических характеристик нейтральных ЭМ $M_{эм} = f(i, l)$ для заданной конструкции (таблица 1).

Задача 2. Составить блок-схему расчета статических характеристик нейтральных ЭМ $\alpha = f(i)$ для заданной конструкции (таблица 1).

Расчет статических характеристик ЭМ провести при следующих конструктивных параметрах:

$$\begin{aligned}
 W &= 1045; \quad r = 680 \text{ м}; \quad \alpha_m = 0,4566 \text{ рад}; \quad C = 0,975 \frac{\text{Нм}}{\text{рад}}; \\
 \alpha_n &= 0,053; \quad \Delta_T = 6 \cdot 10^{-5} \text{ м}; \quad S_T = 0,3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2; \quad S_0 = 0,27 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2; \\
 l_{c1} &= 0,026 \text{ м}; \quad S_{я1} = 0,13 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2; \quad J = 0,287 \cdot 10^{-6} \text{ Нмс}^2; \\
 \nu &= 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}; \quad d = 9 \cdot 10^{-3} \text{ м}; \quad h = 15 \cdot 10^{-6} \text{ Нмс}
 \end{aligned}$$

материал статора – сталь 1211, материал якоря – пермендюр.

Методические указания

Типовые блок-схемы расчета приведены на рис. 6 и 7 причем алгоритм расчёта характеристики $M_{эм} = f(i, l)$ (рис. 6) является составной частью алгоритма расчёта характеристики $\alpha = f(i)$ (рис. 7). В блок-схемах приняты следующие обозначения: $\alpha_j, i_j, \alpha_n, i_n$ - текущие и начальные значения угла поворота якоря и тока; $h_{ij}, h_{\alpha j}, h_{\Phi j}, h_{\alpha H}, h_{im}, h_{эи}$ - значения i -х и j -х шагов по току, углу поворота якоря, магнитному потоку и их начальные значения; $h_{\alpha \min}, h_{i \min}, h_{\Phi \min}$ - минимальные значения шагов, которые выбираются при условии обеспечения заданной точности решения; i, j - индексы, означающие текущие значения параметров ЭМС.

Расчет $M_{yi} = f(\alpha, i)$ проводится с учетом особенностей конструкций рабочих зазоров электромагнитов.

В алгоритме расчета внешней характеристики ЭМС (рис.7) с нейтральным ЭМ $\alpha = f(i)$ предусмотрено переключение по ключу K .

Если $K = 1$, то можно рассчитать значения тока и угла срабатывания ЭМ, если $K = 2$, то можно определить величину тока трогания. Поиск происходит в направлении, указанном стрелкой (рис. 6). Вычисление $M_{эм}$ при известных токах и углах производится согласно алгоритму, представленному на блок-схеме (рис.7).

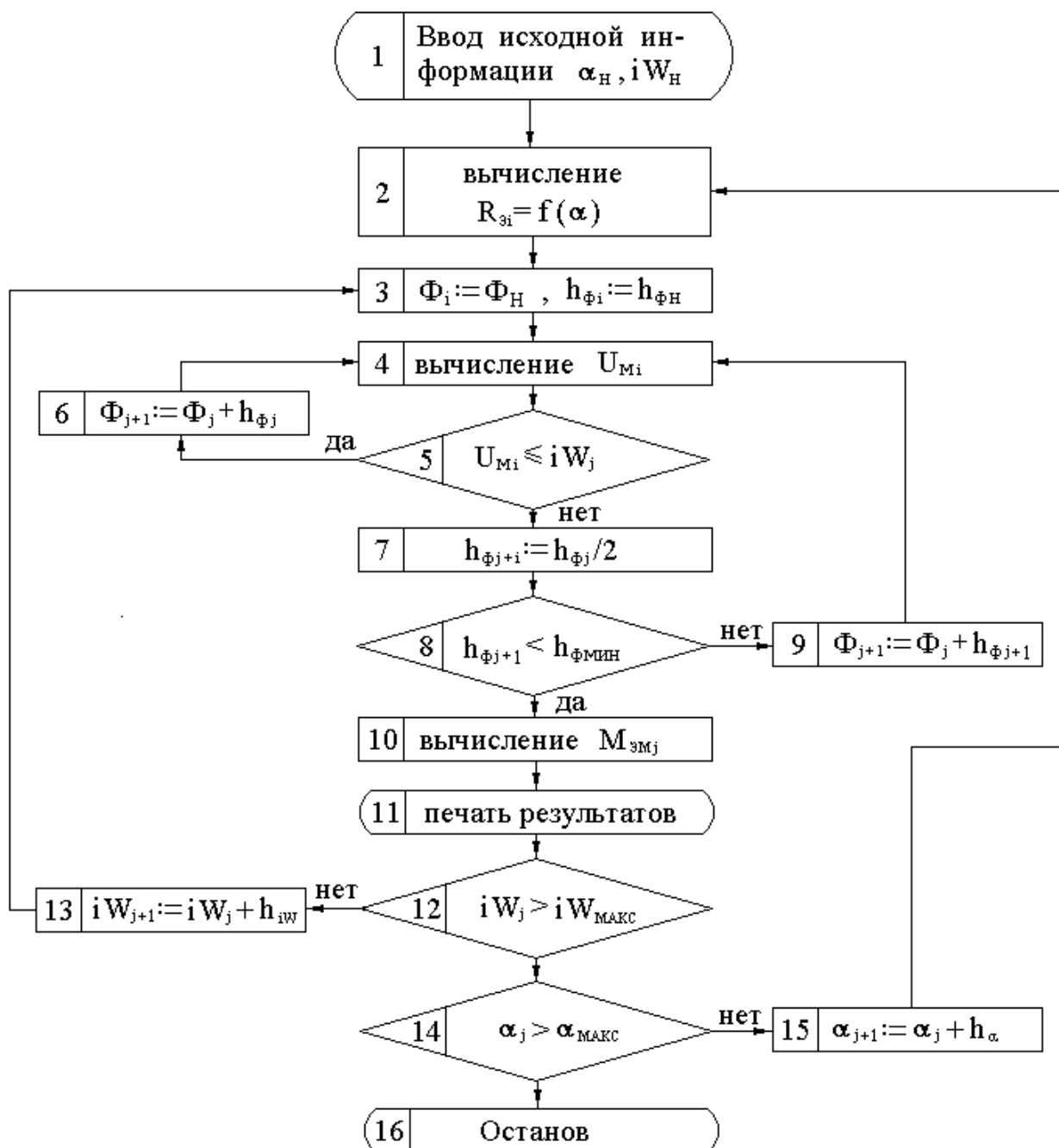


Рис. 6 Блок-схема расчета статической характеристики $M_{yi} = f(\alpha, i)$.

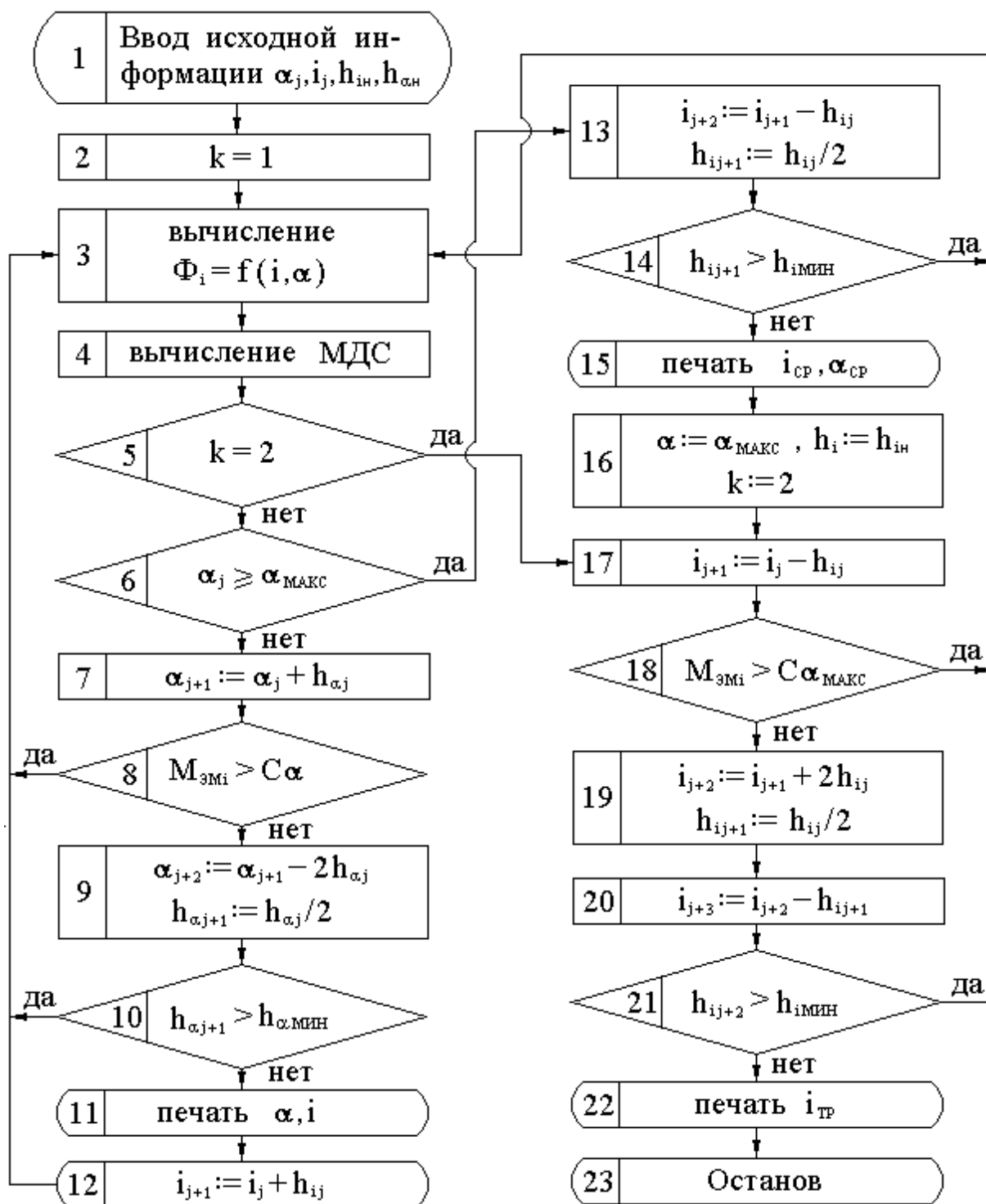


Рисунок 7 Блок-схема расчета статической характеристики $\alpha = f(i)$

Занятие 4. Расчет динамических характеристик электромеханических аппаратов постоянного тока

Цели и задачи практического занятия:

Освоить методики расчета динамических характеристик электромеханических аппаратов постоянного тока

Основные теоретические положения

Расчет динамических характеристик сводится к решению нелинейной математической модели электромеханического аппарата. Для решения обычно используются численные методы интегрирования обыкновенных дифференциальных уравнений, основанные на формулах Эйлера и Рунге - Кутта.

Математическая модель ЭМ приводится к первой нормальной форме Коши [1]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\alpha}{dt} &= \dot{\alpha} \\ \frac{d\dot{\alpha}}{dt} &= \frac{\left(M_{\dot{y}1} + M_{\dot{y}2} - M_i - h\dot{\alpha} - C\alpha \right)}{J}; M_{\dot{y}1,2} = \frac{B_{1,2}^2 S_{1,2}^2}{2} \frac{\partial R_{y1,2}}{\partial \alpha} \\ \frac{di_1}{dt} &= \frac{\left(E_K - i_1 r_1 - i_1 r_{01} - W S_{y1} \frac{dB_1}{dt} \right)}{W^2 G_p}; \\ \frac{di_2}{dt} &= \frac{\left(E_K - i_2 r_2 - i_2 r_{02} - W S_{y2} \frac{dB_2}{dt} \right)}{W^2 G_p}; \\ \frac{dB_1}{dt} &= \frac{(-i_{a1} r_{a1})}{S_{y1}}; \frac{dB_2}{dt} = \frac{(-i_{a2} r_{a2})}{S_{y2}}; \\ i_{a1,2} &= \sum_{j=1}^n l_{yj} H_{yj1,2} + \sum_{j=1}^m l_{cj} H_{cj1,2} + B_{1,2} S_{1,2} (R_{y1,2} + R_T) - i_{1,2} W \end{aligned} \right\}$$

Нелинейность характеристик материала магнитопровода учитывается, как и при расчете статических характеристик, путём интерполяции таблично заданных основных кривых намагничивания.

Перечень задач:

Задача 1. Составить алгоритм переходных процессов в обмотках электромагнита для заданной конструкции (таблица 1).

Задача 2. Составить программу расчета переходных процессов в обмотках электромагнита для заданной конструкции (таблица 1).

Методические материалы:

Шаг интегрирования определяется методом интегрирования и постоянными времени ЭМП. При использовании метода Рунге - Кутты 4-го порядка шаг

$$h \leq (0,1 \dots 0,2)T_s, \quad T_s = \frac{L_0 + M_0}{r + r_0}.$$

Применение алгоритма интегрирования с постоянным шагом позволяет получать достаточно простую и эффективную программу расчета переходных процессов в ЭМС. Погрешность вычисления времени срабатывания, вызванная неизбежными ошибками интегрирования разрывной функции при достижении упора, не превышает размера шага интегрирования.

Типовой алгоритм расчета динамических характеристик в виде блок-схемы представлен на рис.8.



Рисунок 8. Блок-схема расчета переходной характеристики

6. Занятие 5. Анализ статических и динамических характеристик аппаратов

Цели и задачи практического занятия:

Освоить методики анализа статических и динамических характеристик аппаратов

Перечень задач:

Задача 1. Провести анализ функции связи электромагнитов постоянного тока для заданной конструкции (таблица 1). Определить соотношения линейных и нелинейных зон функции. Указать возможность определения функции связи по аналитическим зависимостям. Записать данные зависимости.

Задача 2. Провести анализ статических характеристик электромагнитов постоянного тока для заданной конструкции (таблица 1). Установить причины нелинейности данных характеристик.

Задача 3. Провести анализ динамических характеристик электромагнитов постоянного тока для заданной конструкции (таблица 1). Установить зависимость быстродействия электромагнита от параметров его механической и электрической подсистемы.

Библиографический список:

1. Елецкая Г.П. Электромеханические системы. :учеб. пособие/ Г.П. Елецкая, Н.С. Илюхина, А.П.Панков.-Тула: изд-во ТулГУ,2009-215с.