

НЕЛИНЕЙНОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МАЛЫХ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

В. М. АРШИНСКИЙ, А. А. ЛУКОНИН, В. И. КУЗЬМИН, В. Л. КИРШНЕР

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин и общей электротехники)

В системах автоматического управления находят широкое применение малые машины постоянного тока, несущие функции активных элементов различного рода исполнительных механизмов. В качестве примера может быть назван исполнительный механизм плоского контроллера, приводимый в движение машиной постоянного тока с независимой обмоткой возбуждения типа СЛ-621, мощностью 172 квт.

При создании схем автоматического управления, в которых используются малые машины постоянного тока, требуется знание их динамических свойств. Если в переходном процессе сохраняется питание обмотки возбуждения, то ограничиваются обычно лишь учетом электро-механической постоянной исполнительного механизма, т. е. описывают его поведение линейным дифференциальным уравнением первого порядка. Сложность задачи возрастает с попыткой учесть индуктивность якорной обмотки. В наиболее же полном варианте задачи при переменном возбуждении весь переходный процесс рассматривается как совокупность электро-механического переходного процесса, переходного процесса в якорной обмотке и переходного процесса в обмотке возбуждения.

Если пренебречь реакцией якоря, то можно считать, что переходные процессы в обмотке возбуждения и в обмотке якоря протекают независимо. Но такое предположение допустимо только для крупных машин. У малых же двигателей дополнительные полюса отсутствуют и щетки их сдвинуты с нейтрали. Вследствие этого всякие изменения тока одной из обмоток вызовут появление э. д. с. взаимной индукции в другой обмотке.

Таким образом, для обмотки якоря и обмотки возбуждения имеем соответственно:

$$U_{\text{я}} = R_{\text{я}} i_{\text{я}} + L_{\text{я}} \frac{di_{\text{я}}}{dt} + M \frac{di_{\text{в}}}{dt} + e_{\text{я}} \quad (1)$$

$$U_{\text{в}} = R_{\text{в}} i_{\text{в}} + L_{\text{в}} \frac{di_{\text{в}}}{dt} + M \frac{di_{\text{я}}}{dt} \quad (2)$$

Здесь

$U_{\text{я}}$; $U_{\text{в}}$ — напряжения, приложенные к обмотке якоря и к обмотке возбуждения;

$i_{\text{я}}$; $i_{\text{в}}$ — токи обмоток;

$R_{\text{я}}$; $R_{\text{в}}$ — сопротивления обмоток;

$L_{\text{я}}$; $L_{\text{в}}$ — дифференциальные индуктивности обмоток;
 M — дифференциальная взаимоиндуктивность;
 $e_{\text{д}}$ — противоэдс вращающейся машины.

Уравнения (1) и (2) являются типично нелинейными дифференциальными уравнениями, поскольку и индуктивности, и взаимоиндуктивность зависят прежде всего от степени насыщения магнитопровода.

Изменение магнитного потока во времени сопровождается возникновением вихревых токов в массивных частях магнитопровода. Влияние вихревых токов на обмотку машины формально может быть учтено в рамках выражений (1) и (2), если полагать электрические параметры обмоток зависящими от скорости изменения магнитного потока или, иными словами, от скорости протекания переходного процесса.

Итак, в общем случае

$$\begin{aligned} R_{\text{я}} &= R_{\text{я}} \left(i_{\text{я}}, i_{\text{в}}, \frac{di_{\text{я}}}{dt}, \frac{di_{\text{в}}}{dt} \right) \\ L_{\text{я}} &= L_{\text{я}} \left(i_{\text{я}}, i_{\text{в}}, \frac{di_{\text{я}}}{dt}, \frac{di_{\text{в}}}{dt} \right) \\ R_{\text{в}} &= R_{\text{в}} \left(i_{\text{я}}, i_{\text{в}}, \frac{di_{\text{я}}}{dt}, \frac{di_{\text{в}}}{dt} \right) \\ L_{\text{в}} &= L_{\text{в}} \left(i_{\text{я}}, i_{\text{в}}, \frac{di_{\text{я}}}{dt}, \frac{di_{\text{в}}}{dt} \right) \\ M &= M \left(i_{\text{я}}, i_{\text{в}}, \frac{di_{\text{я}}}{dt}, \frac{di_{\text{в}}}{dt} \right). \end{aligned} \quad (3)$$

С целью выяснения зависимостей (3) нами было проведено две серии экспериментов.

В первой из них ставилась задача: в предположении постоянства $R_{\text{я}}$ и $R_{\text{в}}$ установить функциональные связи

$$\begin{aligned} L_{\text{я}} &= f_1(i_{\text{я}}, i_{\text{в}}) \\ L_{\text{в}} &= f_2(i_{\text{я}}, i_{\text{в}}) \\ M &= f_3(i_{\text{я}}, i_{\text{в}}). \end{aligned} \quad (4)$$

Для решения задачи осциллографировались при неподвижной машине переходные процессы, вызванные: 1) закорачиванием обмотки возбуждения с сохранением питания якорной обмотки; 2) закорачиванием обмотки якоря с сохранением возбуждения.

В исходных режимах задавались различные $I_{\text{я}0}$ и $I_{\text{в}0}$.

Характер осциллограмм представлен на рис. 1.

Рассмотрим осциллограмму рис. 1, а.

В момент времени t_1 и $t_2 \cdot \frac{di_{\text{я}}}{dt} = 0$.

Кроме того, при $t \geq t_3$, практически

$$\frac{di_{\text{я}}}{dt} \approx 0.$$

Тогда из (1), (учитывая $e_{\text{д}}=0$) и (2) для моментов $t=t_1$; $t=t_2$ и $t \geq t_3$, мы можем записать:

$$M = \frac{U_{\text{я}} - R_{\text{я}} i_{\text{я}}}{\frac{di_{\text{я}}}{dt}} \quad (5)$$

$$L_B = - \frac{R_B i_B}{\frac{di_B}{dt}} \quad (6)$$

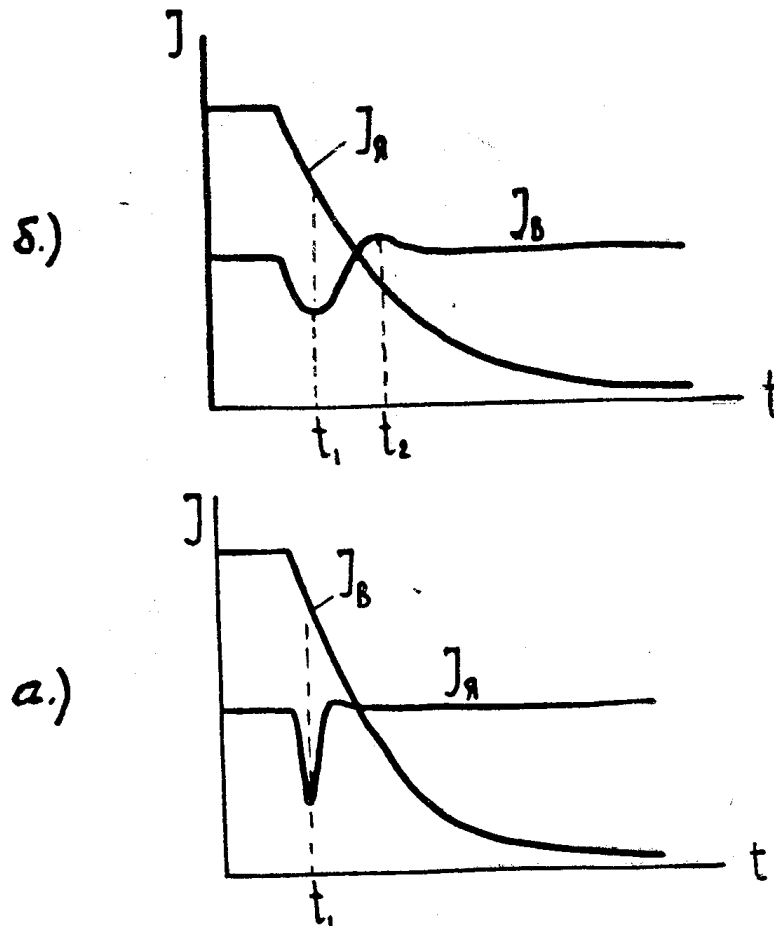


Рис. 1. Осциллограммы переходных процессов:
а) при закорачивании обмотки возбуждения;
б) при закорачивании обмотки якоря.

Аналогично из осциллограммы рис. 1, б следует, что в моменты $t=t_4$; $t=t_5$ и $t \geq t_6 \frac{di_B}{dt}$ либо равно нулю, либо близко к нему. Поэтому из (1) и (2) будем иметь

$$L_{я} = - \frac{R_{я} i_{я}}{\frac{di_{я}}{dt}} \quad (7)$$

$$M = \frac{U_B - R_B i_B}{\frac{di_{я}}{dt}} \quad (8)$$

Иллюстрация результатов, полученных в ходе первой серии экспериментов (применительно к двигателю СЛ-621), приводится на рис. 2.

Рассматривая (рис. 2, а) семейство кривых $L_{я}=f_1(i_{я}, i_B)$, мы убеждаемся, что как при нарастании токов якоря, так и при нарастании тока возбуждения эквивалентное магнитное сопротивление якорному

потоку нарастает. Это легко объясняется ростом насыщения магнитопровода.

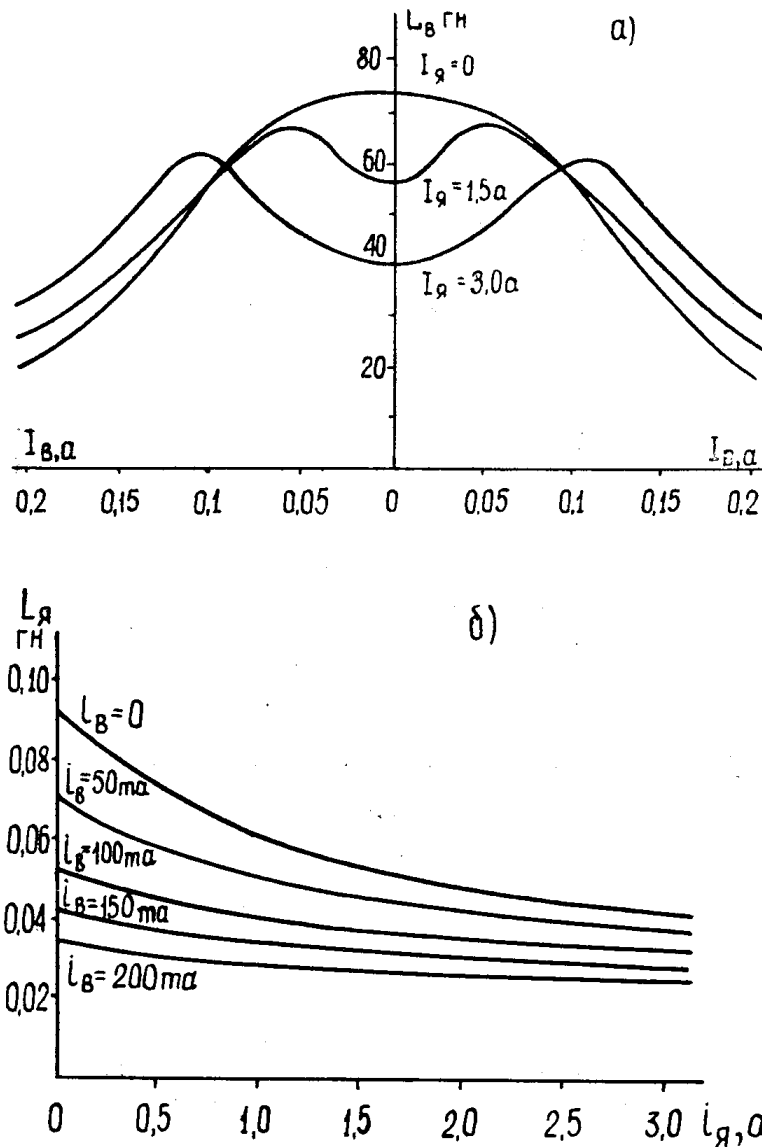


Рис. 2. Кривые зависимостей индуктивностей обмоток от тока якоря и тока возбуждения:
а) для обмотки возбуждения;
б) для обмотки якоря.

Обратимся теперь к семейству кривых $L_B = f_2(i_a, i_B)$. Здесь (рис. 2, б) с ростом тока якоря в области малых токов возбуждения L_B уменьшается, а в области больших токов возбуждения увеличивается. Такой характер кривых диктуется тем, что основная доля в магнитном сопротивлении потоку возбуждения падает на станину.

На одних участках станины составляющие магнитных потоков якоря и возбуждения направлены согласно, на других — встречно. С ростом тока возбуждения уменьшается насыщение участков со встречным направлением потоков и возрастает на участках с согласным направлением. Вследствие этого дифференциальная магнитная проницаемость первых участков возрастает (и более интенсивно), а у других участков — уменьшается. Эквивалентное магнитное сопротивление падает, а индуктивность L_B увеличивается.

Данный процесс наблюдается, видимо, до тех пор, пока интенсивность возрастания дифференциальной магнитной проницаемости участков со встречными потоками не сравняется по результатам своего воздействия с интенсивностью снижения дифференциальной магнитной проницаемости участков с согласными потоками. Индуктивность обмотки возбуждения достигает максимума, а затем, при дальнейшем повышении тока возбуждения, уменьшается.

Большие значения токов якоря требуют и больших значений токов возбуждения, при которых наблюдается экстремум кривой $L_B = f(i_B)$. А это значит, что в момент достижения экстремума участки с согласным направлением потоков будут насыщены в большей степени; эквивалентное магнитное сопротивление оказывается большим, а экстремальное значение индуктивности L_B — меньшим.

Рассмотрим теперь семейство кривых $M = f_3(i_a, i_B)$ (рис. 2, в). Характер изменения взаимной индуктивности под действием увеличивающегося тока возбуждения объясняется, как и выше, снижением дифференциальной магнитной проницаемости эквивалентной цепи. Возрастание же M при увеличении тока якоря вызвано следующими обстоятельствами.

Магнитная цепь машины представляет собою мост. Причем станина образует плечи моста, а по диагоналям располагаются обмотки. Если мост уравновешан ($i_a = 0$), то индуктивная связь между обмотками минимальна. По мере роста тока якоря насыщение плеч моста со встречными потоками уменьшается, а плеч моста с согласными потоками — нарастает. Равновесие мостовой схемы все более нарушается, что приводит к появлению и дальнейшему увеличению диагональных потоков, повышающих магнитную связь обмоток.

Во второй серии экспериментов ставилась задача выяснения чувствительности электрических параметров машины к скорости протекания переходного процесса. Методика экспериментов сводилась к определению зависимости соответствующих параметров от частоты питающего переменного напряжения. Для этого использовался комплект низкочастотной аппаратуры изучения частотных характеристик звеньев систем автоматики.

В электрической схеме экспериментальной установки (рис. 3) были заложены:

ДПВ — двойной пиковый вольтметр, измеряющий амплитуды падений напряжения на испытуемой обмотке U_2 и на некотором известном сопротивлении U_1 ;

НФ — низкочастотный фазометр, позволяющий рассчитать угол сдвига φ между напряжениями U_1 и U_2 ;

НГПК — низкочастотный генератор периодических колебаний, сигналы которого усилены электромашинным усилителем ЭМУ. Последний, кроме того, выполняет функцию развязки цепей приборов.

Определяя в ходе эксперименты при различных частотах U_2 , φ , а также $U_1 = I \cdot R_1$, мы далее простым расчетом находим полное сопротивление испытуемой обмотки

$$Z(\omega) = \frac{U_2}{I} = \frac{U_2}{U_1} R_1 \quad (9)$$

ее индуктивность

$$L(\omega) = \frac{Z_w}{\omega} \sin \varphi \quad (10)$$

и активное сопротивление

$$R(\omega) = \sqrt{[Z(\omega)]^2 - [L(\omega)]^2} \quad (11)$$

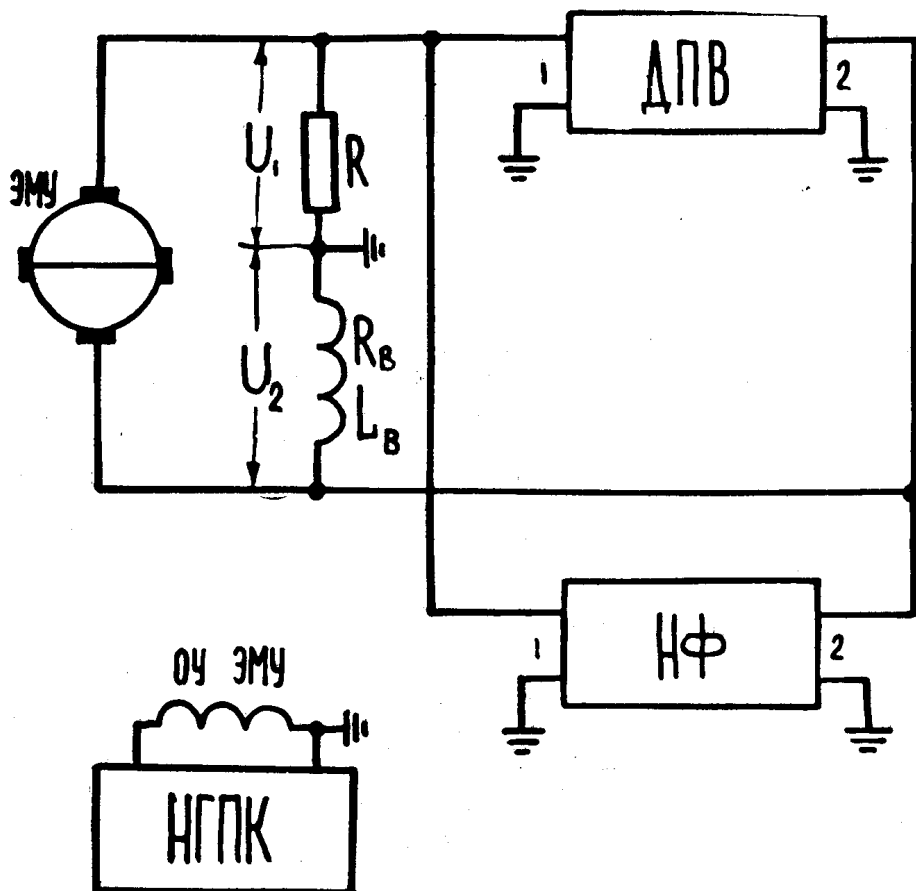


Рис. 3. Схема установки по определению зависимости индуктивности обмотки возбуждения от частоты тока возбуждения.

Результаты обработки экспериментальных данных показали слабую чувствительность $R_{я}$, $R_{в}$, $L_{я}$ и M к частотам в области из низких значений. Наиболее существенно от скорости протекания переходного процесса зависит индуктивность обмотки возбуждения (рис. 4). Подобное явление легко объяснимо, так как магнитная цепь потока воз-

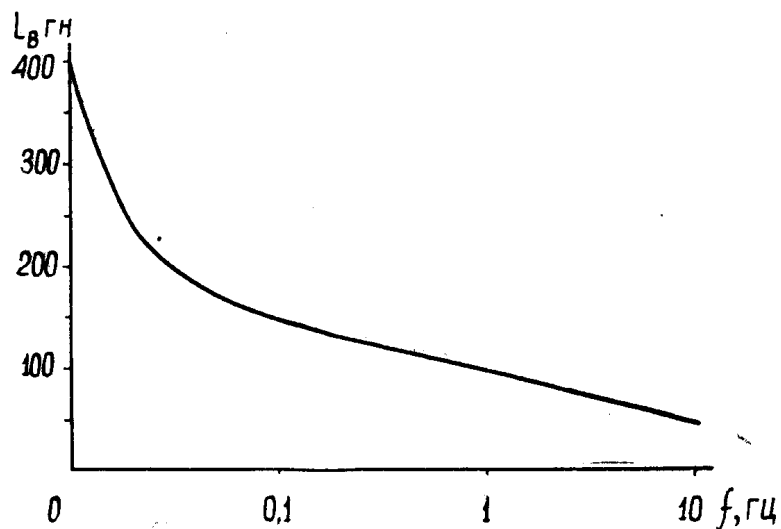


Рис. 4. Кривая зависимости индуктивности обмотки возбуждения от частоты тока возбуждения.

буждения состоит в значительной своей части из массивных стальных конструктивных элементов, создающих благоприятные условия для возникновения вихревых токов.

Выводы

1. Электрические параметры малых машин постоянного тока являются сугубо нелинейными величинами.

2. Качественное описание переходных процессов в системах автоматического управления, использующих малые машины, возможно только при условии учета этих нелинейностей.

3. Особое внимание должно быть обращено на чувствительность электрических параметров к скорости протекания переходного процесса.

4. Методика экспериментального определения зависимости электрических параметров от частоты развивает и существенно уточняет методику, известную из [1].

ЛИТЕРАТУРА

1. В. П. Андреев, Ю. А. Сабинин. Основы электропривода, Госэнергоиздат, 1963.