

УПРОЩЕННЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В МАГНИТНЫХ УСИЛИТЕЛЯХ С САМОНАСЫЩЕНИЕМ

А. Д. Школьников

Магнитные усилители (МУ) с самонасыщением благодаря ряду достоинств широко распространены в схемах автоматики. Разработка достаточно простых методов расчета переходных процессов в таких схемах является актуальной задачей. Так как одним из наиболее эффективных

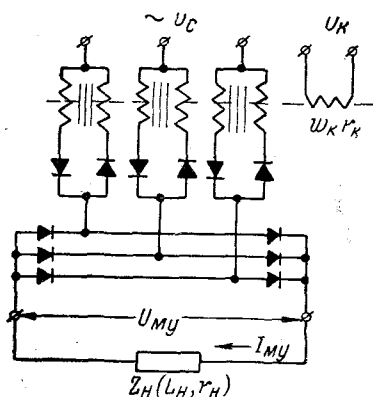


Рис. 1. Схема магнитного усилителя

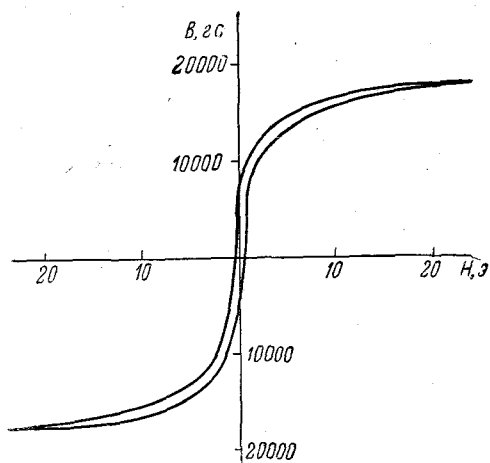


Рис. 2. Статическая кривая намагничивания материала сердечника ТМУ (сталь ХВП)

способов исследования динамики систем авторегулирования является электро моделирование, то при разработке инженерных методов расчета целесообразно предусматривать возможность использования серийных электро моделирующих установок.

В настоящей работе рассматривается схема трехфазного магнитного усилителя (ТМУ) с индуктивной нагрузкой Z_H , применяемая в ряде схем электропривода (рис. 1, 2).

Переходные процессы в МУ с самонасыщением рассматривались Г. Н. Стормом [1] и М. А. Розенблатом [2]. Однако из-за существенных ограничений (в основном рассматривались МУ с кривой намагничивания, близкой к прямоугольной) методы расчета, изложенные в этих работах,

не учитывают целого ряда физических особенностей, имеющих место при работе схемы — например, форсировки напряжения на выходе моста при индуктивной нагрузке. Явление форсировки в МУ без самонасыщения изучалось Л. А. Бессоновым [3], однако предложенный им графоаналитический метод расчета очень сложен.

Для расчета переходных процессов в схеме ТМУ примем следующие допущения.

1. Вентили полагаем идеальными (в схеме применяются германиевые вентили) и влиянием коммутации пренебрегаем. Эти допущения позволяют считать постоянным коэффициент пропорциональности между средними значениями тока нагрузки и тока дросселя, а статические характеристики схемы при работе на активную и на индуктивную нагрузки — одинаковыми.

2. Коэффициент внутренней положительной обратной связи по току рабочих обмоток равен единице и среднее значение потока Φ_0 в сердечниках ТМУ зависит только от ампер-витков управления. Поток Φ_0 зависит также и от переменной МДС, однако этой связью, заметной в основном при работе в ненасыщенной области, т. е. при малых токах дросселя, в дальнейшем будем пренебрегать.

3. Влиянием контура, образованного рабочими обмотками дросселя, на переходный процесс пренебрегаем, так как э. д. с. самоиндукции, возникающая в этой цепи при изменении Φ_0 , большую часть периода приложенного напряжения запирается обратным напряжением вентилей.

Все эти допущения достаточно точно подтверждаются экспериментальными данными.

Так как динамическая кривая намагничивания сердечника дросселя также значительно отличается от идеальной, то в течение всего периода приложенного напряжения дроссель представляет собой конечное сопротивление для тока, проходящего по рабочим обмоткам. Даже при положительной МДС управления из-за наличия индуктивности насыщения сопротивление дросселя не падает до нуля. Среднее значение (за период приложенного напряжения) этого сопротивления зависит от ампер-витков управления, а в области малых рабочих токов — еще и от сопротивления внешней цепи, т. е. величины тока дросселя.

Таким образом, эквивалентная схема ТМУ может быть представлена в виде генератора с внутренним сопротивлением, зависящим от двух переменных: ампер-витков управления и тока дросселя.

Пренебрежение влиянием коммутации и постоянная зависимость между током дросселя и током нагрузки позволяют включить в эквивалентную схему выпрямительный мост и рассматривать ток и напряжение на нагрузке Z_H как выходные величины эквивалентной схемы (рис. 3).

Такое представление о работе ТМУ с самонасыщением и кривой намагничивания сердечников, отличной от идеальной, позволяет согласовать экспериментальные данные об отсутствии размагничивающего действия рабочего тока на поток Φ_0 с внешними характеристиками системы ТМУ — выпрямительный мост (рис. 4).

Такой же МУ, но с прямоугольной кривой намагничивания материала сердечников можно представить в виде генератора с внутренним сопротивлением равным нулю, так как активное сопротивление рабочих

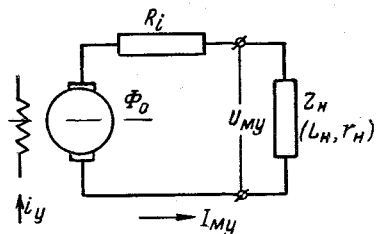


Рис. 3. Эквивалентная схема ТМУ

обмоток несоизмеримо мало по сравнению с сопротивлением нагрузки [2, стр. 278].

При указанных допущениях переходной процесс описывается следующими уравнениями:

$$\sum_k \frac{U_k w_k}{r_k} = i\omega_y + \frac{d\Phi_0}{dt} \sum_k \frac{w_k^2}{r_k} 10^{-8}, \quad (1)$$

$$\Delta\Phi_0 = f_1(i\omega_y), \quad (2)$$

$$U_{\text{мy}} = f_2(I_{\text{мy}}, i\omega_y), \quad (3)$$

$$U_{\text{мy}} = I_{\text{мy}} r_{\text{н}} + L_{\text{н}} \frac{dI_{\text{мy}}}{dt}, \quad (4)$$

где $U_{\text{мy}}$ и $I_{\text{мy}}$ — напряжение и ток на выходе системы ТМУ — выпрямительный мост, т. е. на нагрузке;

w_k , r_k и U_k — число витков, сопротивление и напряжение, приложенное к k -ой обмотке управления ТМУ;

$\Delta\Phi_0$ — приращение среднего значения потока ТМУ.

Зависимость (2) снимается баллистическим методом на ТМУ, собранном в рабочую схему (см. рис. 1) с активным сопротивлением, равным $r_{\text{н}}$ в качестве нагрузки.

Так как статические характеристики схемы при работе на активную и индуктивную нагрузки совпадают, то в качестве зависимости (3) можно использовать внешние характеристики, снятые при работе ТМУ на переменное активное сопротивление (см. рис. 4).

При решении уравнений (1) — (4) на математических машинах непрерывного действия (типа МН-7, МНБ и т. п.) следует иметь в виду, что из-за отсутствия в их составе блоков, воспроизводящих функции двух переменных, нелинейную зависимость (3) с помощью известных методов [4, 5] необходимо аппроксимировать функциями одной переменной.

Учитывая физические особенности работы схемы, уравнения (1) — (4) можно значительно упростить. Для этого на основании эквивалентной схемы представим уравнение (3) в виде

$$U_{\text{мy}} = U'_{\text{мy}} + R_i \Delta I_{\text{мy}}, \quad (5)$$

где $U'_{\text{мy}} = f(i\omega_y)$ — зависимость напряжения на выходе моста от ампервитков управления в статическом режиме при работе ТМУ на активное сопротивление $r_{\text{н}}$;

$$R_i = \left| \frac{dU_{\text{мy}}}{dI_{\text{мy}}} \right| \text{ — наклон внешней характеристики (рис. 4);}$$

$$\Delta I_{\text{мy}} = \frac{U'_{\text{мy}}}{r_{\text{н}}} - I_{\text{мy}}. \quad (6)$$

При работе ТМУ в области от холостого хода (см. рис. 4, точка А) до номинальной нагрузки (точка В) можно считать, что R_i зависит

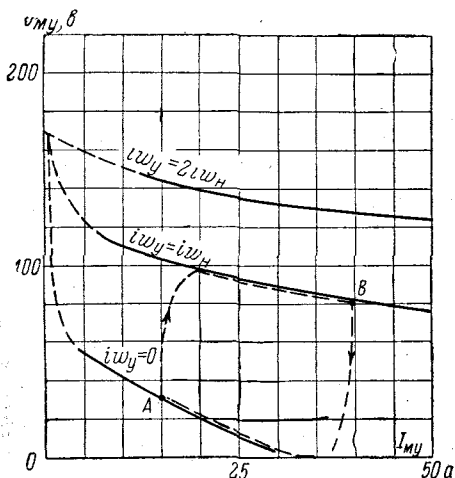


Рис. 4. Внешние характеристики системы ТМУ — выпрямительный мост

только от ампер-витков управления. Кроме того, так как изменение ампер-витков происходит значительно быстрее изменения тока $I_{\text{мy}}$, то и изменение R_i заканчивается значительно раньше, чем переходной процесс в нагрузке. Это справедливо при простейших режимах работы ТМУ (включение, отключение обмоток управления), поэтому для таких режимов можно принять, что переходной процесс протекает при постоянной величине $R_i = k$, которая соответствует установившемуся значению ампер-витков управления.

Тогда после несложных преобразований

$$U_{\text{мy}} = U'_{\text{мy}} + \frac{k}{k + r_{\text{н}}} L_{\text{н}} \frac{dI_{\text{мy}}}{dt}. \quad (7)$$

Затем построим зависимость

$$\Delta\Phi_0 = f(U'_{\text{мy}}).$$

Метод построения по характеристикам $\Delta\Phi_0 = f(i\omega_y)$ и $U'_{\text{мy}} = f(i\omega_y)$ виден на рис. 5. Ввиду подобия форм этих характеристик зависимость $\Delta\Phi_0 = f(U'_{\text{мy}})$ на рабочем участке обычно можно аппроксимировать прямой, т. е. принять $\Delta\Phi_0 = K_U U'_{\text{мy}}$.

После этого из уравнений (1)–(4) можно исключить $\Phi_0(t)$ и $U_{\text{мy}}(t)$. Тогда уравнения переходного процесса

$$\sum_k \frac{U_k \omega_k}{r_k} = i\omega_y + \frac{dU'_{\text{мy}}}{dt} \sum_k \frac{\omega_k^2}{r_k} K_U 10^{-8}, \quad (8)$$

$$U'_{\text{мy}} = f(i\omega_y), \quad (9)$$

$$U'_{\text{мy}} = I_{\text{мy}} r_{\text{н}} + \frac{r_{\text{н}}}{k + r_{\text{н}}} L_{\text{н}} \frac{dI_{\text{мy}}}{dt}. \quad (10)$$

Машинное решение этих уравнений не представляет труда и требует минимального количества аппаратуры.

Как видно из уравнений (7)–(10), во время переходного процесса напряжение на выходе моста увеличивается пропорционально наклону внешних характеристик ТМУ и скорости изменения тока нагрузки

$$\Delta U_{\text{мy}} = \frac{k}{k + r_{\text{н}}} L_{\text{н}} \frac{dI_{\text{мy}}}{dt}. \quad (11)$$

Причина этого явления заключается в перераспределении напряжения между ТМУ и возросшим эквивалентным сопротивлением на выходе моста. Действие этой форсировки аналогично уменьшению постоянной времени нагрузки в $\left(1 + \frac{k}{r_{\text{н}}}\right)$ раз. Так, для приведенного ниже примера

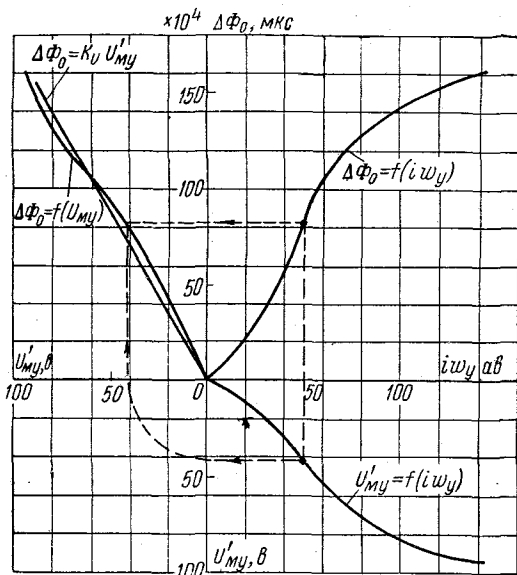


Рис. 5. Графическое определение коэффициента $K_U = \frac{\Delta\Phi_0}{U'_{\text{мy}}}$

при включении $\frac{k}{r_H} \approx 0,5$ и постоянная времени нагрузки уменьшается примерно в 1,5 раза.

На рис. 6 приведены осциллограммы включения и отключения задающей обмотки трехфазного магнитного усилителя типа МУП на обмотку возбуждения генератора поворота экскаватора ЭКГ-8.

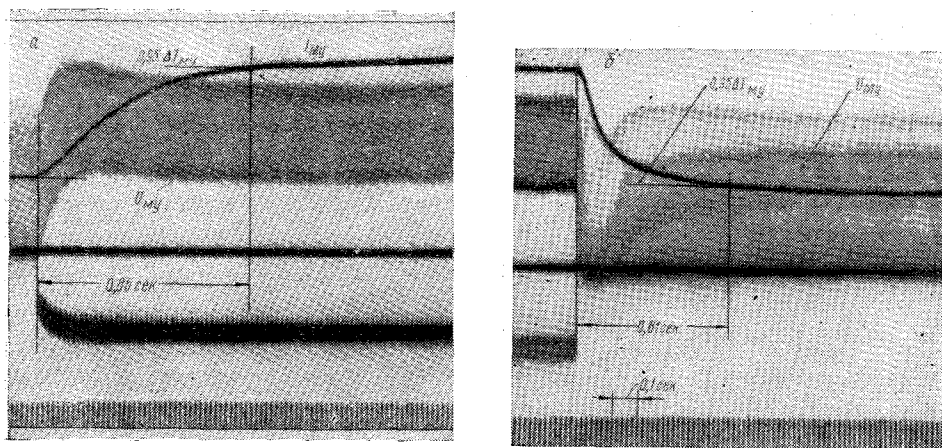


Рис. 6. Переходной процесс в ТМУ с индуктивной нагрузкой:
а и б — включение и выключение управляющего сигнала

Осциллограммы рис. 7 получены по изложенному выше методу на модели МН-7. При решении дополнительно учитывалась нелинейная зависимость индуктивности обмотки возбуждения от тока и постоянная вихревых токов.

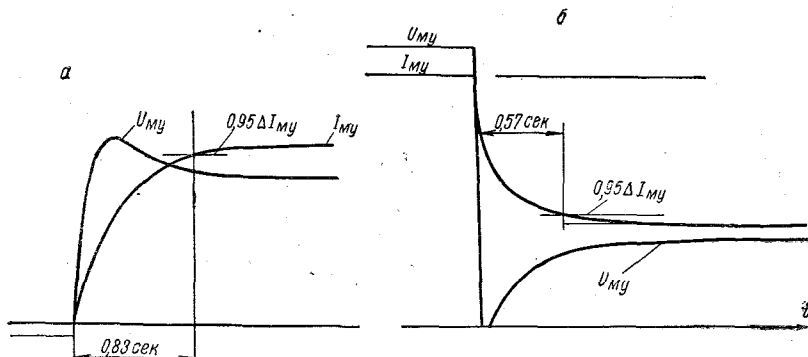


Рис. 7. Осциллограммы переходных процессов, полученные на модели МН-7:

а и б — включение и выключение управляющего сигнала

Как видно из осциллограмм, метод дает достаточно хорошее совпадение кривых тока $I_{\mu}(t)$.

На осциллограммах рис. 6, 7 хорошо заметна форсировка напряжения U_{μ} , которая значительно ускоряет переходной процесс.

На рис. 4 пунктиром показан качественный характер траектории движения системы. При отключении напряжение U_{μ} становится равным нулю, так как э. д. с. самоиндукции, направленная согласно с напряжением U_{μ} , открывает вентили моста. Этот момент заметен на рис. 4; 6, б; 7, б.

Выводы

1. Рассмотренный упрощенный метод расчета переходных процессов в ТМУ с самонасыщением при работе на индуктивную нагрузку достаточно прост и позволяет объяснить основные физические процессы, происходящие в системе.

2. Метод основывается на использовании статических характеристик $\Delta\Phi_0 = f(i\omega_y)$ и $U_{\text{мy}} = f(I_{\text{мy}}, i\omega_y)$, снимаемых при работе на активную нагрузку.

3. Метод допускает приведение уравнений к машинному виду и решение их на электро моделирующих устройствах при минимальном количестве необходимой аппаратуры.

4. Данный метод основывается на упрощенной трактовке работы ТМУ как регулируемого сопротивления, и поэтому его следует рассматривать как составную часть инженерных методов расчета таких систем электропривода с ТМУ, где не требуется точность более 10—15% (например, системы электропривода экскаваторов и т. п.).

ЛИТЕРАТУРА

1. Сторм Г. Ф. Магнитные усилители. Изд-во иностр. лит-ры, 1957.
2. Розенблат М. А. Магнитные усилители. Изд-во «Сов. радио», т. II, 1960.
3. Бессонов Л. А. Автоколебания в электрических цепях со сталью. ГЭИ, 1958.
4. Этерман И. И. Математические машины непрерывного действия. Машгиз, 1957.
5. Pike E. W., Silverberg T. R. Mach. Design, 1952, № 24 (7), (8).