

УДК 621.318.3

В.И. Семёнов, доцент, канд. техн. наук

В.В. Чмут, доцент, канд. техн. наук

Севастопольский национальный технический университет

Студгородок, г. Севастополь, Украина, 99053

E-mail: root@sevgtu.sebastopol.ua

АНАЛИЗ И РАСЧЁТ ОБРАТНЫХ СВЯЗЕЙ В МАГНИТНОМ УСИЛИТЕЛЕ

Предлагается метод расчёта коэффициентов внутренней и внешней обратных связей в магнитном усилителе с самонасыщением.

Широкое внедрение полупроводниковой и микромодульной техники привело к сокращению использования магнитных усилителей (МУ). Однако в некоторых специальных устройствах, таких как магнитные зонды, схемы управления тиристорами, трансформаторы постоянного тока, а также в случае работы устройств в сложных условиях (резкие перепады температуры, высокая радиация и пр.) магнитные усилители остаются востребованными.

Наибольшее применение находят МУ (рисунок 1) с внутренней и внешней обратными связями (ОС), которые позволяют варьировать в широком диапазоне его статические и динамические параметры. Внутренняя ОС здесь реализована включением диодов VD1 и VD2 последовательно с рабочими обмотками МУ. По рабочим обмоткам протекают пульсирующие токи, содержащие постоянные составляющие, которые по величине, как и весь рабочий ток, определяются входным сигналом. Магнитные поля, создаваемые постоянными составляющими рабочего тока, складываются в сердечниках с магнитными полями, создаваемыми входным сигналом, осуществляя внутреннюю обратную связь. Для правой ветви статической характеристики преобразования МУ без обратных связей (рисунок 2) эта ОС положительна, а для левой – отрицательна. Предложить аналитические выражения для расчёта величины внутренней ОС и знака и величины необходимой внешней ОС – цель статьи.

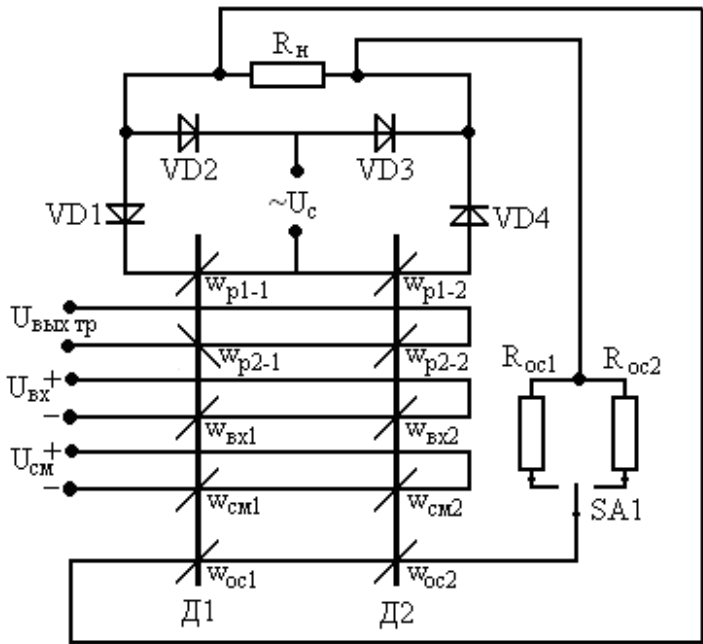


Рисунок 1 – Схема электрическая принципиальная магнитного усилителя

Внешняя обратная связь реализуется с помощью обмоток w_{oc1} и w_{oc2} , на которые подаётся сигнал с выхода МУ. На рисунке 1 внешняя ОС параллельная и отрицательная для рабочей (правой) ветви характеристики. Величину внешней ОС можно задавать, меняя ток в цепи обратной связи с помощью резисторов R_{oc1} , R_{oc2} и ключа SA1.

В МУ, показанном на рисунке 1, действует ещё одна обратная связь. Как видно из схемы, в каждый полупериод $\sim U_c$ ток в рабочей цепи протекает только по одной рабочей обмотке, другая закрыта диодами. Для сердечника, ток в обмотке w_p которого протекает, этот полупериод называется рабочим, а сам сердечник намагничивается полем рабочего тока.

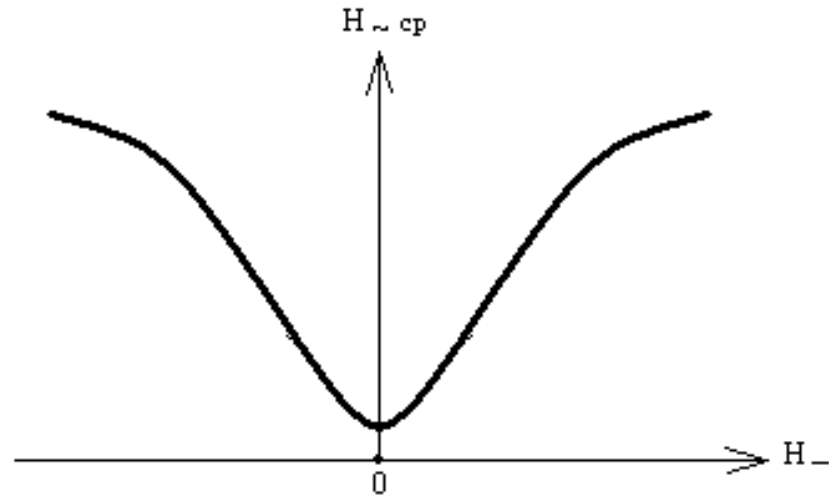


Рисунок 2 – Статическая характеристика преобразования магнитного усилителя без обратных связей

Для сердечника, ток в обмотке w_p которого не протекает, этот полупериод называется управляющим, а сердечник размагничивается постоянным полем входного тока. В обмотке w_{ex} сердечника, для которого текущий полупериод рабочий, трансформируется напряжение, которое оказывается включённым последовательно и согласно с входным сигналом. По величине трансформируемое напряжение пропорционально сигналу в нагрузке, а значит, и входному сигналу. Поэтому оно является обратной связью, действующей между сердечниками по цепи входных обмоток. Эта обратная связь получила название дополнительной.

Существенная нелинейность процессов, протекающих в МУ, не позволяет аналитически и раздельно описать внутреннюю и дополнительную обратные связи. Поэтому расчёт статических характеристик и параметров МУ проводят с использованием графо – аналитических методов. Описанные особенности работы МУ также не позволяют оценить его динамические свойства с приемлемой точностью. Однако, если не стремиться внутреннюю и дополнительную обратные связи описать раздельно, а квалифицировать их как одну внутреннюю обратную связь, оказывается возможным количественно оценить её и в дальнейшем использовать для целей анализа и расчёта как самого усилителя, так и системы, где он применён.

Существует различные методы расчёта МУ. Наибольшее распространение получили те из них, в которых размеры магнитопровода выбираются из стандартного ряда сердечников, учитывающего некоторые оптимальные условия, и производство которых освоено промышленностью. Расчёт с использованием динамической кривой размагничивания материала сердечников и геометрических факторов Γ_1 и Γ_2 можно считать наиболее современным и точным. Динамической кривой размагничивания (ДКР) называют геометрическое место вершин частных несимметричных динамических петель гистерезиса, снятых в условиях, когда намагничивание и размагничивание осуществляются от источников тока, развязанных друг от друга. Отсюда, считается, что в ДКР геометрически учтено влияние внутренней обратной связи. ДКР – обязательная справочная информация для ферромагнитного материала.. Вид кривой (рисунок 3) определяется типом ферромагнетика, толщиной применённых в сердечнике пластин или ленты и частотой напряжения питания рабочей цепи МУ. Γ_1 и Γ_2 – условные обобщённые параметры сердечников, связывающие их размеры с обмотками с электрическими, магнитными и тепловыми параметрами. Γ_1 используется при необходимости задать определённый температурный режим работы МУ, а Γ_2 – при необходимости задать требуемый коэффициент полезного действия МУ. Достаточно подробно этот метод изложен в [1]. Однако, расчёт коэффициентов внутренней (коэффициента самонасыщения) и внешней обратных связей не проводится, полагая, что они учтены графически в ДКР. Поэтому, динамические параметры магнитного усилителя – постоянная времени, добротность, передаточная функция – не определяются. Анализ работы систем управления, в которых применяются МУ, требует знания этих коэффициентов.

Исходными данными при расчёте магнитного усилителя обычно являются следующие:

- выходные параметры – сопротивление нагрузки и номинальная мощность в ней;
- входные параметры – номинальный входной ток и мощность входного сигнала;
- частота источника напряжения питания, схема усилителя, материал и форма магнитопровода;
- допустимая температура перегрева обмоток.

Расчёт коэффициентов обратных связей предлагается выполнять следующим образом. На ДКР выделяется рабочий участок NM (рисунок 3). Номинальный рабочий режим отображается точкой N, режим холостого хода – точкой М. Основной закон идеального магнитного усилителя позволяет утверждать, что на рабочем участке приращение средней величины переменной напряжённости магнитного поля в сердечнике равно приращению постоянной напряжённости:

$$\Delta H_{\sim cp} = \Delta H_{\Sigma} + \Delta H_{oc}^{(внт)} . \quad (1)$$

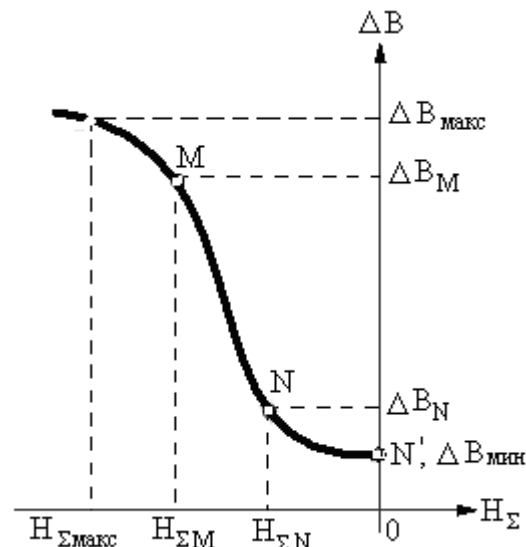


Рисунок 3 – Динамическая кривая размагничивания материала сердечника

Переменная напряжённость $\Delta H_{\sim cp}$ создаётся током рабочей обмотки и по закону полного тока равна

$$\Delta H_{\sim cp} = 0,5 \cdot \Delta I_n \cdot w_p / l_c, \quad (2)$$

где ΔI_n – приращение тока в нагрузке между точками М и N; w_p – число витков рабочей обмотки; l_c – длина средней магнитной линии используемого сердечника.

Напряжение на нагрузке в точках М и N известно, так как

$$\begin{aligned} U_n &= U_c - e_p, \\ e_p &= -4,44 w_p S f \Delta B. \end{aligned}$$

ΔB считывается с ДКР. Это позволяет найти

$$\Delta I_n = \frac{U_{nN} - U_{nM}}{R_n} \quad (3)$$

и $\Delta H_{\sim cp}$.

Постоянная напряжённость создаётся токами обмоток входной ($H_{вх}$), смещения ($H_{см}$), внешней обратной связи ($H_{oc}^{(внц)}$) и постоянной составляющей тока рабочей цепи (внутренняя обратная связь – $H_{oc}^{(внт)}$). В (1) $\Delta H_{\Sigma} = H_{вх} + H_{oc}^{(внц)}$, так как эти напряжённости в режиме холостого хода (точка М) равны нулю, а смещение для всех точек одинаково. Величина ΔH_{Σ} определяется так же по ДКР, как

$$\Delta H_{\Sigma} = H_{\Sigma N} - H_{\Sigma M} . \quad (4)$$

Теперь, пользуясь (1), можно найти величину изменения напряжённости внутренней обратной связи, создаваемой в сердечниках на рабочем участке ДКР:

$$\Delta H_{oc}^{(внт)} = \Delta H_{\sim cp} - \Delta H_{\Sigma} . \quad (5)$$

После расчёта по (3) ΔI_n определяется требуемый от МУ коэффициент усиления по току

$$k_i^{(mp)} = \frac{\Delta I_n}{I_{вхN}},$$

где $I_{вхN}$ – входной сигнал усилителя, задаваемый исходными данными на расчёт. Затем рассчитывается общий (суммарный) коэффициент обратной связи, которую необходимо ввести в МУ, то есть

$$k_{oc}^{(\Sigma)} = 1 - \frac{k_i}{k_i^{mp}},$$

где $k_i = \frac{w_{вх}}{w_p}$ – коэффициент усиления по току рассчитываемого усилителя без обратных связей.

Рекомендуется выбрать $k_i = 0,5 \dots 5,0$, причём, чем больше k_i^{mp} , тем больше надо брать k_i .

Общий коэффициент обратной связи $k_{oc}^{(\Sigma)}$ складывается из следующих компонентов: $k_{oc}^{(внт)}$ – коэффициента самонасыщения (внутренней обратной связи) и $k_{oc}^{(внц)}$ – коэффициента внешней обратной связи. Из (2), (4) и (5) рассчитываются

$$\begin{aligned} k_{oc}^{внт} &= \frac{\Delta H_{oc}^{(внт)}}{\Delta H_{\sim cp}} = \frac{\Delta H_{\sim cp} - \Delta H_{\Sigma}}{\Delta H_{\sim cp}} = \frac{(0,5 \cdot \Delta I_n \cdot w_p / l) - (H_{\Sigma N} - H_{\Sigma M})}{0,5 \cdot \Delta I_n \cdot w_p / l} = \\ &= \frac{\Delta I_n \cdot w_p - 2(H_{\Sigma N} - H_{\Sigma M}) \cdot l_c}{\Delta I_n \cdot w_p} \end{aligned}$$

и

$$k_{oc}^{(внц)} = k_{oc}^{\Sigma} - k_{oc}^{(внт)} + \frac{I_{вс}}{I_{нN}}. \quad (6)$$

В правую часть (6) введено слагаемое $I_{вс}/I_{нN}$, которое учитывает размагничивающее действие обратного тока вентилях, включённых последовательно с рабочими обмотками усилителя. Соответствующее увеличение положительной обратной связи компенсирует его. Значение $k_{oc}^{(внц)}$, а также учёт выбранной схемы осуществления ОС (последовательная или параллельная) и диапазона подстройки, позволяют рассчитать параметры обмоток обратной связи. Кроме того, полученные величины $k_{oc}^{\Sigma}, k_{oc}^{(внт)}, k_{oc}^{(внц)}$ дают возможность найти динамические параметры МУ и указывают пути изменения последних.

Итак, предлагаемое расширение методики расчёта МУ по геометрическим факторам позволяет определить все параметры обратной связи, необходимой для получения требуемых коэффициента усиления и динамики проектируемого МУ. При этом становится возможным в дальнейшем проводить анализ динамических свойств системы, использующей этот МУ. Практическое изготовление и испытание МУ, рассчитанного с использованием предлагаемого метода для ОС, дало экспериментальное подтверждение его достоверности. В изготовленном МУ были предусмотрены дополнительные рассчитанные витки обмотки обратной связи. Это позволило испытать его не только в усилительном, но и в режиме бесконтактного магнитного реле с заранее заданным коэффициентом возврата.

Часто необходимые свойства усилителя, вводимого в систему автоматического управления, описываются графически. Описанный в статье подход к расчёту обратных связей в МУ позволяет ожидать, что по известной статической характеристике МУ можно определить его параметры, а затем провести конструктивный расчёт. Это задача дальнейших исследований в данном направлении.

Библиографический список

1. Шопен Л.В. Бесконтактные электрические аппараты автоматики / Л.В. Шопен. — М.: Энергия, 1996. — 568 с.

Поступила в редакцию 28.04.2007 г.