

*А.И. РОГАЧЁВ*, докт. техн. наук, проф. НТУ «ХПИ»

*В.М. ЛЕЩЕНКО*, инж. НТУ «ХПИ»

*В.А. ЗАГРЕБЕНЮК*, бакалавр НТУ «ХПИ»

## **КОНТРОЛЬ НАСЫЩЕНИЯ СЕРДЕЧНИКОВ ТРАНСФОРМАТОРОВ ИМПУЛЬСНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ**

В цій статті вивчається вплив насичення осердя трансформатору на роботу імпульсних джерел живлення, а також розглядаються методи контролю насичення.

Influence of transformer core saturation on impulse power supply is studied in this article, also methods of saturation control are examined.

**Введение.** Подавляющее большинство импульсных источников питания выполняется на основе трансформаторов. Их широкое применение объясняется очень высоким КПД (около 98–99%), надежностью в работе, возможностью преобразования напряжения в широких пределах, обеспечением гальванической развязки основных схем от питающей сети, что позволяет источнику питания защищать цепи нагрузки от внезапных бросков напряжения питания. В итоге мы получаем возможность создать источник питания любой требуемой мощности (разумеется, в рамках возможностей сети питания) с заданным напряжением питания, который будет подключаться к стандартной питающей сети (например, ~380В). При этом потери при преобразовании напряжения в таком источнике питания будут минимальными.

Казалось бы, мы получили возможность создавать источники питания с необходимыми параметрами. Отчасти это так и есть. Разработаны методики расчета импульсных блоков питания, которые позволяют в зависимости от типа блока питания, требуемых номинальных значений мощности, напряжения и тока рассчитать параметры источника питания.

Но стоит отметить, что у сердечников трансформаторов, на основе которых создаются источники питания, существует такое явление как насыщение. Это явление заключается в резком изменении магнитных свойств материала сердечника и возникает при превышении током первичной обмотки определенной величины. Значение магнитной проницаемости при достижении насыщения резко падает (например, оно может снизиться от нескольких тысяч единиц до всего лишь нескольких единиц), что приведет к быстрому и значительному росту тока в первичной обмотке трансформатора.

**Цель статьи** – показать влияние насыщения сердечника трансформатора на работу импульсных источников питания, а также показать преимущества и возможности программно-аппаратного контроля насыщения сердечника.

**Магнитные процессы в трансформаторах.** В импульсных источниках питания для управления значением выходной величины (тока или напряжения) широко используется ШИМ-управление. В этом случае контроллер блока питания при помощи драйверов (обычно транзисторы в ключевом режиме или тиристоры) посылает на первичную обмотку трансформатора импульсный сигнал, при этом скважность импульсов определяет значение выходной величины.

Рассмотрим протекание физических процессов в импульсном источнике питания с широтно-импульсной модуляцией. Предположим, что управляющий сигнал имеет вид, изображенный на рис. 1а. В этом случае для первичной обмотки (рис. 2) согласно второму закону Кирхгофа

$$\begin{aligned} \bar{u}_1(t) + \bar{e}_1(t) &= 0, \\ u_1(t) - L_1 \frac{di_1(t)}{dt} &= 0, \\ L_1 \frac{di_1}{dt} &= u_1(t), \\ \frac{di_1(t)}{dt} &= \frac{u_1(t)}{L_1}, \\ i_1(t) &= \frac{1}{L_1} \int u_1(t) dt. \end{aligned} \quad (1)$$

Очевидно, что кривая тока первичной обмотки  $i_1(t)$ , имея интегральную зависимость от напряжения  $u_1(t)$ , будет иметь вид, показанный на рис. 1б

Если учесть, что магнитный поток можно определить как  $\Phi = B \cdot S \cdot N = L \cdot i$ , при этом магнитная индукция имеет вид  $B = \mu \mu_0 i \frac{N}{l}$ , где

$\Phi$  – магнитный поток через обмотку трансформатора, Вб

$B$  – магнитная индукция сердечника трансформатора, Тл

$S$  – площадь сечения обмотки трансформатора, м<sup>2</sup>

$N$  – число витков в обмотке

$L$  – индуктивность обмотки, Гн

$\mu$  – магнитная проницаемость материала сердечника

$\mu_0$  – магнитная постоянная  $\mu_0 = 1,2566 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$

$l$  – длина обмотки, м

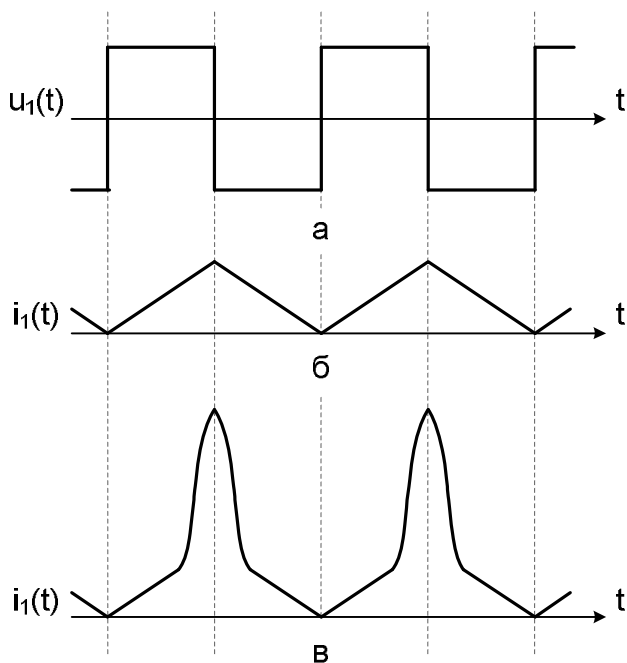


Рис. 1 – кривые тока и напряжения в первичной обмотке

Исходя из сказанного можно составить равенство

$$\mu\mu_0 i \frac{N}{l} \cdot S \cdot N = Li,$$

$$L = \mu\mu_0 \frac{N^2}{l} \cdot S. \quad (2)$$

Подставляя (2) в (1) получим следующее выражение

$$i_1(t) = \frac{l}{\mu\mu_0 N^2 S} \int u_1(t) dt$$

Как видно из полученного выражения ток первичной обмотки обратно пропорционален магнитной проницаемости  $i_1(t) \sim \frac{1}{\mu}$ .

Полученное соотношение позволяет объяснить процессы, происходящие при насыщении сердечника трансформатора. При резком снижении магнитной проницаемости ток в первичной обмотке трансформатора, как величина обратная магнитной проницаемости, столь же резко возрастает (рис. 1в). Так как при выходе сердечника трансформатора в режим насыщения происходит значительное изменение магнитной проницаемости материала сердечника

(она может снизиться на несколько порядков – от тысяч единиц до нескольких единиц – при относительно небольшом увеличении напряженности магнитного поля), то рост тока в первичной обмотке будет происходить столь же интенсивно.

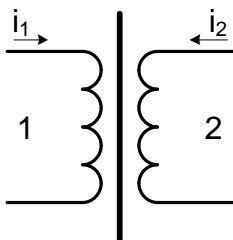


Рис. 2 – упрощенная схема трансформатора

**Методы борьбы с насыщением.** Приведенные рассуждения показывают, что выход трансформатора в режим насыщения может привести к повреждению первичной обмотки (из-за резкого скачка тока в ней). Кроме того, в режиме насыщения значительно возрастут тепловые потери трансформатора, что приведет к значительному снижению его КПД, а значит, сильно уменьшит эффективность его работы.

Безусловно, все предлагаемые методики расчета трансформаторов разработаны таким образом, чтобы полученный по результатам использования конкретной методики трансформатор не достигал насыщения при условии работы в пределах номинальных значений токов и напряжений.

Подобный результат может быть получен либо за счет использования избыточного по своему размеру сердечника трансформатора, либо введением в сердечник трансформатора зазора. В первом случае, увеличение физических размеров сердечника затрудняет или делает невозможным его насыщение при номинальных токах в обмотках. Во втором случае, появление зазора в сердечнике приводит к значительному снижению магнитного потока, что в итоге приводит к схожему результату (невозможность насыщения).

Конечно, в результате мы получим трансформатор с требуемыми параметрами и безопасный в работе. Однако такой подход изначально неэффективен в плане полноценного использования возможностей трансформатора. В первом случае, приходится наращивать массу сердечника, что приводит к его удорожанию и ухудшению массо-габаритных характеристик. Это все равно, что использовать кувалду вместо молотка – и дороже, и тяжелее, и неудобнее. Во втором случае, сердечник никогда не будет использоваться на полную мощность из-за разорванности магнитного потока. По сути, необходимо взять высококачественный сердечник с хорошими характеристиками – и распилить его, чтобы ухудшить характеристики и таким образом не допустить

насыщения. Кроме того, так как введение зазора в сердечник трансформатора приводит к ослаблению магнитного потока, то в результате может появиться необходимости увеличения количества витков в обмотках, что опять же будет означать увеличение массы и размеров трансформатора, а также его стоимости.

Однако существует альтернативный способ организации работы трансформаторов в источниках питания. Этот способ предполагает программно-аппаратный контроль состояния сердечника трансформатора с целью недопущения его насыщения. Трансформатор при необходимости может быть оснащен специальным контроллером, который будет способен формировать сложные кривые тока и напряжения требуемого вида. При условии использования широтно-импульсной модуляции для управления значением выходной величины (например, выходного напряжения источника питания) применение контроллера, построенного на основе современного микропроцессора (микроконтроллера) также будет оправданным. В этом случае возможно построение гибкой и достаточно универсальной программы, которая будет управлять работой источника питания. Дополнительно программу контроллера можно будет оснастить алгоритмом, который при обнаружении первых признаков интенсивного роста тока в первичной обмотке будет предпринимать меры по его снижению и недопущению перехода сердечника в насыщенное состояние.

Алгоритм работы контроллера может варьироваться в зависимости от требуемых эффективности, быстродействия, стоимости. Простейший способ организации контроля – проверка на превышение током некоторой пороговой величины. При ее достижении скважность импульсов должна быть уменьшена, что приведет к снижению тока в первичной обмотке.

Другой вариант предусматривает вычисление приращения тока за определенный интервал (вычисление первой производной кривой тока). Превышение производной определенного порогового значения будет свидетельствовать о начале насыщения. Использование производной должно точнее выявлять момент перехода в насыщение. Но даже относительно небольшое увеличение длительности ШИМ-импульса может привести к быстрому переходу сердечника трансформатора в режим насыщения. Поэтому этот алгоритм предъявляет определенные требования к быстродействию системы.

Кроме того, для повышения качества работы контроллера можно добавить в состав трансформатора специальную измерительную обмотку. Она позволит измерять токи без влияния нагрузки, которая может приводить к колебаниям тока, его временному увеличению или, наоборот, просадке. В результате, мы сможем исключить ложные срабатывания. Общий алгоритм работы контроллера показан на рис. 3.

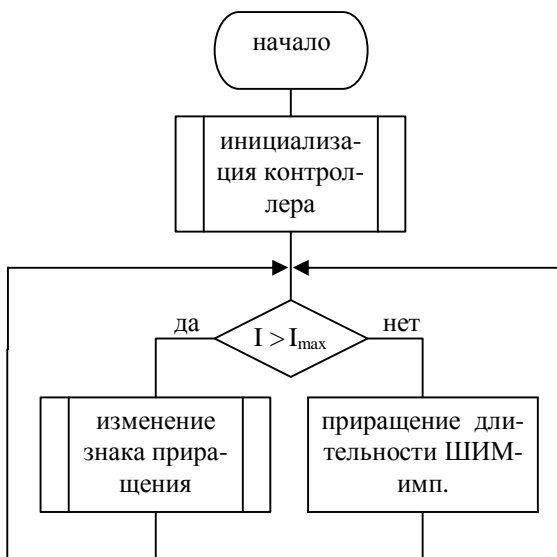


Рис. 3 – Общий алгоритм работы контроллера

**Выводы.** В данной статье рассмотрены негативные аспекты влияния насыщения на стабильную и безопасную работу импульсных источников питания. Также предложены современные методы борьбы с этим явлением, основанные на программно-аппаратном контроле состояния сердечника при помощи специально разрабатываемого контроллера. Предполагается, что в будущем будут разработаны соответствующие схемные и программные решения, реализующие предложенные методы.

**Список литературы** 1. Преображенский А.А., Бишард Е.Г. – «Магнитные материалы и элементы: Учебник для студентов вузов» – 3-е издание, перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1986г. 2. Марти Браун – «Источники питания. Расчет и конструирование» – К., «МК-Пресс», 2007г. 3. Селезнев Ю.А. – «Основы элементарной физики» под ред. проф. Яворского Б.М. – изд. 4-е, перераб., М., «Наука», 1974г. 4. Мансуров Н.Н., Попов В.С. – «Теоретическая электротехника» – изд. 7-е, перераб. – М., «Госэнергоиздат», 1958г.

Поступила в редакцию 19.05.2010