

УДК 621.311.6.049.77

*Кандидаты техн. наук Ш. Х. Кутуев и Л. М. Ковалев,  
Б. А. Игнатьев и А. Б. Смирнов*

## РАСЧЕТ ИНДУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С СЕРДЕЧНИКАМИ ИЗ МАГНИТОДИЭЛЕКТРИКОВ НА ОСНОВЕ АНАЛИТИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ ИХ ФЕРРОМАГНИТНЫХ СВОЙСТВ

На основе нелинейной аппроксимации основной кривой намагничивания получены аналитические выражения для определения параметров магнитодиэлектриков типа молибденового пермаллоя, сердечники из которого находят широкое применение в индуктивных элементах вторичных источников питания (ВИП). Предложена инженерная методика расчета дросселей сглаживающих фильтров и накопительных дросселей и трансформаторов импульсных ВИП, минимизирующая объем индуктивных элементов. Приведены результаты расчета конкретных дросселей, подтверждающих эффективность разработанной методики.

При проектировании микроэлектронных ВИП с импульсным преобразованием электроэнергии особо жесткие требования предъявляются к удельным массогабаритным характеристикам индуктивных элементов [1], от которых значительно зависят размеры микроблоков.

В импульсных ВИП в последнее время широкое распространение получили дроссели и трансформаторы с магнитодиэлектрическими сердечниками из материала МП-140, МП-160. Этот материал обладает сравнительно небольшими потерями на гистерезис на высоких (до 100 кГц) частотах и сохраняет свои свойства в сильных полях, что делает его незаменимым в сердечниках индуктивных элементов, работающих с постоянным подмагничиванием, так как исключает необходимость введения немагнитного зазора.

Основная кривая намагничивания рассматриваемого материала характеризуется пологостью и отсутствием резко выраженного насыщения, благодаря чему становится возможным его использование при больших амплитудах напряженности магнитного поля с заходом на нелинейный участок кривой. Целесообразность работы в таком режиме обусловлена необходимостью как можно полнее использовать энергонакопительные свойства сердечника, что особенно важно для дросселей импульсных стабилизаторов напряжения (ИСН) и трансформаторов однотактных преобразователей напряжения с обратным включением диода (ПНО).

Однако в этом случае традиционные методы расчета дросселей и трансформаторов, использующие линейную аппроксимацию основной кривой намагничивания [2, 3] или линеаризацию зависимости эквивалентной магнитной проницаемости  $\mu_e$  от напряженности магнитного поля  $H$  [4], приводят к снижению точности получаемых результатов. Более точные результаты могут быть получены при проектировании дросселей с учетом нелинейной зависимости  $\mu_e = f(H)$  [5, 6]. Однако материалы работы [5] могут быть использованы только при проектировании дросселей ИСН, работающих в режиме непрерывных токов, а полученные в литературе [6] аналитические выражения сложны, что не позволяет при расчете обойтись без ЭВМ.

В данной статье на основе предложенного нелинейного аналитического описания ферромагнитных свойств сердечников МП-140 предпринята попытка разработать инженерную методику расчета индуктивных элементов, используемых в современных ВИП как в качестве сглаживающих, так и накопительных.

Основная кривая намагничивания, определяющая свойства любого ферромагнитного материала, для магнитодиэлектриков типа молибденового пермаллоя достаточно хорошо аппроксимируется функцией вида:

$$B = \alpha \operatorname{th} \beta H, \quad (1)$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  — некоторые постоянные коэффициенты.

Величину и физический смысл коэффициентов  $\alpha$  и  $\beta$  определим из известных параметров магнитных материалов:

индукции насыщения

$$B_s = \lim_{H \rightarrow \infty} B = \alpha \lim_{H \rightarrow \infty} \operatorname{th} \beta H = \alpha$$

и начальной магнитной проницаемости

$$\mu_n = \frac{1}{\mu_0} \left. \frac{dB}{dH} \right|_{H \rightarrow 0} = \frac{\alpha}{\mu_0} \left. \frac{d(\operatorname{th} \beta H)}{dH} \right|_{H \rightarrow 0} = \frac{\alpha \beta}{\mu_0},$$

где  $\mu_0$  — магнитная постоянная =  $1,256 \cdot 10^{-6}$  м/А.

Таким образом, коэффициенты аппроксимации определяются параметрами материала следующим образом:

$$\begin{cases} \alpha = B_s, \\ \beta = \frac{\mu_0 \mu_n}{B_s}. \end{cases}$$

Как видно из рис. 1, функция (1) хорошо аппроксимирует реальную кривую намагничивания при значениях  $\alpha = 0,7$  Тл,  $\beta = 2,513 \cdot 10^{-4}$  м/А.

Используя аппроксимацию (1), получим выражения для статической  $\mu_{ст}$  и дифференциальной  $\mu_d$  магнитной проницаемости материала МП-140:

$$\begin{cases} \mu_{ст} = \frac{B}{\mu_0 H} = \frac{\alpha \operatorname{th} \beta H}{\mu_0 H} = \mu_n \frac{\operatorname{th} \beta H}{\beta H}, \\ \mu_d = \frac{1}{\mu_0} \frac{dB}{dH} = \frac{\alpha \beta}{\mu_0 \operatorname{ch}^2 \beta H} = \frac{\mu_n}{\operatorname{ch}^2 \beta H}. \end{cases} \quad (2)$$

Рассчитанные по этим формулам кривые  $\mu_{ст} = f(H)$  и  $\mu_d = \varphi(H)$  хорошо вписываются в область разброса экспериментально полученных

зависимостей статической и дифференциальной магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля (рис. 2).

Кривая 4 рис. 2 соответствует режиму работы индуктивного элемента при некотором постоянном значении напряженности и неболь-

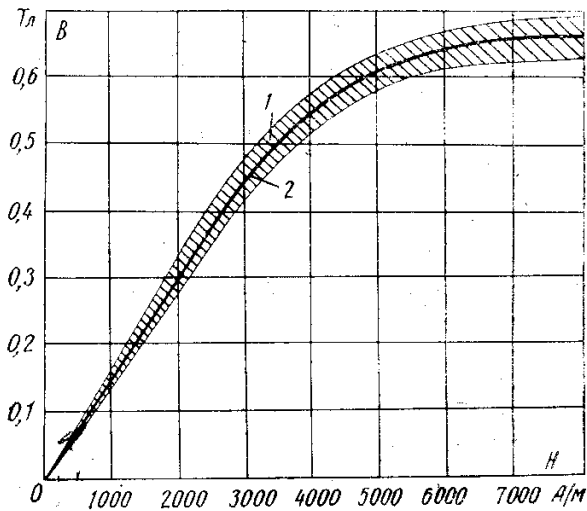


Рис. 1. Область изменения (1) и аппроксимирующая кривая (2) зависимости индукции от напряженности магнитного поля для магнитопроводов из молибденового пермаллоя МП-140

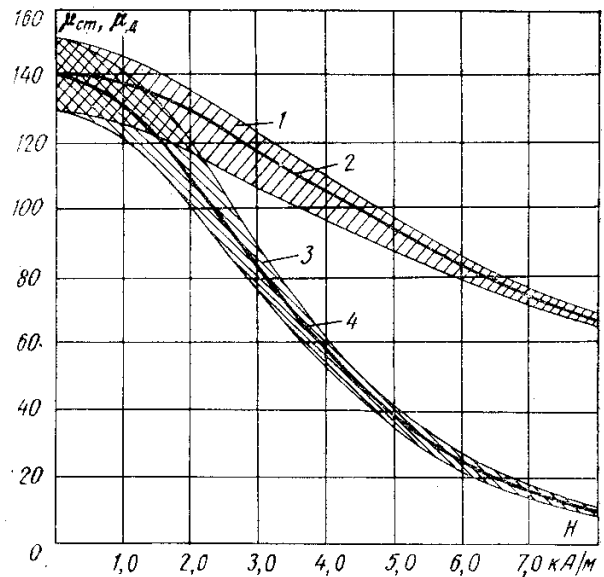


Рис. 2. Области изменения (1, 3) и аппроксимирующие кривые (2, 4) зависимости статической и дифференциальной проницаемости от напряженности магнитного поля для материала МП-140

ших амплитудах переменной составляющей магнитного поля  $H_0$ . При этом согласно закону полного тока

$$H_0 = I_0 N / l_s, \quad (3)$$

где  $I_0$  — ток подмагничивания,

$N$  — число витков обмотки,

$l_s$  — средняя длина магнитной силовой линии.

Данный режим характерен для дросселей сглаживающих фильтров ВИП. Дифференциальная индуктивность такого дросселя, выполненного на сердечнике тороидальной формы, определяется с помощью известного выражения [2]:

$$L_d = d\Psi/di = \mu_0 \mu_d (N^2 Q / l_s),$$

где  $\Psi$  — потокосцепление в катушке дросселя,

$i$  — ток через обмотку,

$Q$  — площадь сечения сердечника.

Подставляя сюда  $\mu_d$  из формулы (2), получим зависимость дифференциальной индуктивности дросселя на сердечнике из МП-140 от напряженности магнитного поля:

$$L_d = \frac{\mu_0 \mu_n N^2 Q}{l_s \operatorname{ch}^2 \beta H_0}. \quad (4)$$

Подставив в уравнение (4) вместо  $N$  его выражение из формулы (3) и умножив обе части равенства на  $I_0^2$ , получим:

$$L_d I_0^2 = \frac{\mu_0 \mu_n l_s Q H_0^2}{\operatorname{ch}^2 \beta H_0} = \mu_0 \mu_n \frac{V H_0^2}{\operatorname{ch}^2 \beta H_0}, \quad (5)$$

где  $V$  — объем сердечника.

Исследование функции (5) показывает, что произведение  $L_d I_0^2$  имеет максимум при некоторой напряженности магнитного поля  $H_1$ , определяемой из уравнения:

$$\beta H_1 = 1/\text{th } \beta H_1.$$

Численное решение этого уравнения при приведенном выше значении коэффициента  $\beta$  дает величину  $H_1 = 4775$  А/м.

Наличие максимума у функции (5) позволяет минимизировать объем дросселя при заданных индуктивности и токе подмагничивания.

Для этого, подставив в формулы (4) и (5) численные значения  $\mu_0$ ,  $\mu_n$ ,  $\beta$  и  $H_1$ , получим простые соотношения, связывающие объем сердечника из МП-140 и число витков сглаживающего дросселя минимального габарита с заданными индуктивностью  $L_d$  и током подмагничивания:

$$V = 0,82 L_d I_0^2 \text{ [мкГн, А];}$$

$$N = 48 l_s / I_0 \text{ [см, А].}$$

Другая разновидность индуктивных элементов ВИП — накопительные дроссели ИСН и трансформаторы ПНО. Особенностью их работы является широкий диапазон изменения величины напряженности магнитного поля и индукции в каждом цикле накопления — отдачи электромагнитной энергии. Магнитная проницаемость сердечника при этом изменяется в соответствии с кривой 2 на рис. 2.

Важнейшим параметром дросселей ИСН и трансформаторов ПНО является мгновенное значение накопленной в них энергии  $W$ , которая определяется напряженностью магнитного поля  $H$  и индукцией в сердечнике  $B$  [7]:

$$W = V \omega = V \int_B H dB,$$

где  $\omega$  — плотность энергии магнитного поля.

Подставив в это выражение принятую аппроксимацию (1), произведя интегрирование и поделив обе части равенства на  $V$ , получим:

$$\omega = (\alpha/\beta) (\beta H \text{th } \beta H - \ln \text{ch } \beta H). \quad (6)$$

Эффективность накопления магнитной энергии индуктивным элементом можно оценить величиной изменения плотности энергии, приходящейся на единицу изменения напряженности магнитного поля:

$$v_\omega = d\omega/dH = \alpha\beta (H/\text{ch}^2 \beta H). \quad (7)$$

Чем больше эта величина, тем, очевидно, выше накопительные свойства индуктивного элемента.

Для приведенных выше коэффициентов  $\alpha$  и  $\beta$  построены графики зависимостей  $\omega = \varphi(H)$  и  $v_\omega = \xi(H)$  (рис. 3). Как видно из рисунка, для материала МП-140 величина  $v_\omega$  имеет максимум при некоторой напряженности поля  $H_2$ . Действительно, дифференцируя выражение (6) по  $H$  и приравнявая производную нулю, получим уравнение относительно напряженности  $H_2$ , при которой величина изменения плотности энергии максимальна:

$$2\beta H_2 = 1/\text{th } \beta H_2. \quad (8)$$

Численное решение уравнения (8) при принятом значении  $\beta$  дает величину  $H_2 = 3072$  А/м.

Наличие экстремума у функции (7) позволяет связать максимальную эффективность накопления энергии с объемом магнитного материала и тем самым минимизировать объем накопительного индуктивного элемента. Для этого определим сначала значение энергии  $W$ , которое необходимо накопить в дросселе или трансформаторе за период коммутации  $T$ :

$$W = \Theta P_{\text{вых}} T [1 + (P_{\text{п}}/P_{\text{вых}})], \quad (9)$$

где  $\Theta$  — коэффициент, зависящий от структурного построения силовой части импульсного ВИП;

$P_{\text{вых}}$  — выходная мощность ИСН или ПНО;

$P_{\text{п}}$  — мощность потерь в силовой части ИСН или ПНО.

Коэффициент  $\Theta$  учитывает тот факт, что в дросселях ИСН полярно-инвертирующего типа и ПНО накапливается вся энергия, отдаваемая

в нагрузку за период коммутации, поэтому  $\Theta = 1$ . В дросселях ИСН понижающего и повышающего типов запасается только часть электроэнергии, определяемая соотношением входных и выходных напряжений, поэтому  $\Theta$  равен модулю относительной разности последних, т. е.

$$\Theta = \left| \frac{U_{\text{вх}} - U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} \right|.$$

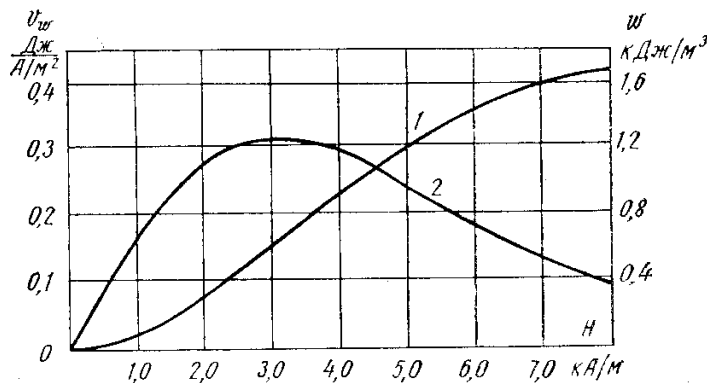


Рис. 3. Зависимость плотности энергии в дросселе (1) и эффективности ее накопления (2) от напряженности магнитного поля

Следующим шагом при минимизации объема дросселя является выбор максимального мгновенного значения напряженности магнитного поля  $H_{\text{макс}}$ . Как было сказано выше, максимальная эффективность накопления энергии в сердечнике МП-140 достигается при напряженности  $H_{\text{макс}} = H_2$ . Однако, как видно из рис. 3, абсолютная величина плотности энергии с возрастанием  $H$  продолжает увеличиваться. Поэтому в ряде случаев, когда к габаритам индуктивных элементов предъявляются особо жесткие требования, целесообразно выбирать величину  $H_{\text{макс}} > H_2$ . Верхняя граница напряженности магнитного поля определяется областью безопасной работы коммутирующих элементов, поскольку мгновенные токи через них увеличиваются прямо пропорционально  $H$ .

Зная величину  $W$  и  $H_{\text{макс}}$ , можно определить минимальный объем магнитопровода накопительного элемента:

$$V = W / w_{\text{макс}}, \quad (10)$$

где  $w_{\text{макс}}$  вычисляется по формуле (6) при  $H = H_{\text{макс}}$ .

Выражение для определения числа витков обмотки дросселя или трансформатора, обеспечивающих режим непрерывных токов, легко выводится из закона электромагнитной индукции:

$$N = (U_L t_{\text{и}}) / [(B_{\text{макс}} - B_{\text{мин}}) Q], \quad (11)$$

где  $U_L$  — напряжение, прикладываемое к индуктивному элементу;

$t_{\text{и}}$  — длительность импульса накопления энергии в каждом цикле;

$B_{\text{макс}}$ ,  $B_{\text{мин}}$  — максимальная и минимальная индукция в сердечнике.

Необходимое соотношение числа витков первичной и вторичной обмоток трансформатора ПНО вычисляется по формуле [8]:

$$N_1/N_2 = \{ [(U_{\text{вых}} + U_F)/U_{\text{вх}}] (T/t_{\text{и}} - 1) \},$$

где  $N_1, N_2$  — число витков первичной и вторичной обмоток,  
 $U_F$  — падение напряжения на коммутирующем диоде в прямом направлении.

Выведенные в статье соотношения позволяют определить намоточные данные дросселей минимального объема как накопительных, так и сглаживающих фильтров.

В качестве иллюстрации приведем порядок расчета накопительного дросселя ИСН, обеспечивающего режим непрерывных токов при минимальном входном напряжении и критический режим при максимальном.

1. По формуле (9) определяется энергия, которую необходимо накопить в дросселе за период коммутации  $T$ .

2. С помощью формулы (10) определяется минимальный объем сердечника  $V$ .

3. По таблице конструктивных параметров магнитопроводов МП-140 выбирается конкретный типоразмер сердечника с объемом  $V' \geq V$ .

4. С помощью формулы (10) уточняется плотность, запасаемая в выбранном сердечнике.

5. По рис. 3 находится величина  $H_{\text{макс}}$ , а по рис. 1 — величина  $B_{\text{макс}}$ .

6. Учитывая, что в критическом режиме  $B_{\text{мин}} = 0$ , по формуле (11) определяется число витков обмотки дросселя.

7. Вычисляется мгновенный максимальный ток через дроссель:

$$i_{L \text{ макс}} = (H_{\text{макс}} l_s)/N.$$

Выбор диаметра провода производится по известной методике [напр., 2].

С помощью приведенной методики был сделан расчет накопительного дросселя ИСН понижающего типа со следующими входными и выходными параметрами:  $U_{\text{вх.макс}} = 34$  В,  $U_{\text{вх.мин}} = 24$  В,  $U_{\text{вых}} = 20$  В,  $P_{\text{вых}} = 40$  Вт,  $T = 50$  мкс.

Дроссель имеет следующие намоточные данные: типоразмер сердечника К20×12×6,5, число витков 35; обмотка выполнена в два провода диаметром 0,69; активное сопротивление обмотки 0,035 Ом.

Для сравнения приведем параметры дросселя для данного ИСН, рассчитанные по методике [5]: типоразмер магнитопровода — К20×12×6,5; число витков 130; диаметр провода 0,69 мм; активное сопротивление 0,2 Ом.

Таким образом, дроссель, рассчитанный по предлагаемой методике, за счет более полного использования материала сердечника имеет в 3,7 раза меньшее количество витков, благодаря чему его объем в 1,31 раза меньше, а мощность потерь снизилась с 0,8 до 0,1 Вт.

## Выводы

1. С помощью предложенной аппроксимации основной кривой намагничивания получены аналитические выражения, связывающие энергетические и конструктивные параметры сердечников тороидальной конструкции, выполненных из магнитодиэлектрических материалов.

## Конструктивные параметры магнитопроводов из материала МП-140

| Объем сердечника $V$ , см <sup>3</sup> | Средняя длина силовой магнитной линии $l_s$ , см | Сечение сердечника $Q$ , см <sup>2</sup> | Типоразмер | Количество сердечников | Объем сердечника $V$ , см <sup>3</sup> | Средняя длина силовой магнитной линии $l_s$ , см | Сечение сердечника $Q$ , см <sup>2</sup> | Типоразмер  | Количество сердечников |
|--|--|--|------------|------------------------|--|--|--|-------------|------------------------|
| 0,151                                  | 2,513  | 0,06                                     | K10×6×3    | 1                      | 1,8048                                 | 4,7  | 0,384                                    | K19×11×4,8  | 2                      |
| 0,226                                  | 2,513  | 0,09                                     | K10×6×4,5  | 1                      | 1,8492                                 | 3,45   | 0,536                                    | K15×7×6,7   | 2                      |
| 0,302                                  | 2,513  | 0,12                                     | K10×6×3    | 2                      | 1,9248                                 | 4,24   | 0,454                                    | K17×10×6,5  | 2                      |
| 0,452                                  | 2,513  | 0,18                                     | K10×6×4,5  | 2                      | 2,233                                  | 5,8  | 0,385                                    | K25×13×7    | 1                      |
| 0,471                                  | 3,14   | 0,15                                     | K13×7×5    | 1                      | 2,5192                                 | 4,7  | 0,536                                    | K19×11×6,7  | 2                      |
| 0,514                                  | 2,67   | 0,192                                    | K12×5×5,5  | 1                      | 2,6104                                 | 5,02   | 0,52                                     | K20×12×6,5  | 2                      |
| 0,6624                                 | 3,45   | 0,192                                    | K19×7×4,8  | 1                      | 3,3176                                 | 5,8  | 0,572                                    | K24×13×5,2  | 2                      |
| 0,9024                                 | 4,7  | 0,192                                    | K19×11×4,8 | 1                      | 3,964                                  | 9,6  | 0,413                                    | K36×25×7,5  | 1                      |
| 0,9246                                 | 3,45   | 0,218                                    | K15×7×6,7  | 1                      | 4,466                                  | 5,8  | 0,77                                     | K24×25×9,7  | 2                      |
| 0,942                                  | 3,14   | 0,3                                      | K13×7×5    | 2                      | 5,126                                  | 9,6  | 0,534                                    | K36×25×9,7  | 1                      |
| 0,9624                                 | 4,24   | 0,227                                    | K17×10×6,5 | 1                      | 6,5088                                 | 11,3   | 0,576                                    | K44×28×7,2  | 1                      |
| 1,028                                  | 2,67   | 0,385                                    | K12×5×5,5  | 2                      | 7,928                                  | 9,6  | 0,826                                    | K36×25×7,5  | 2                      |
| 1,2596                                 | 4,7  | 0,268                                    | K19×11×6,7 | 1                      | 9,3112                                 | 11,3   | 0,824                                    | K44×28×10,3 | 1                      |
| 1,3052                                 | 5,02   | 0,26                                     | K20×12×6,5 | 1                      | 10,252                                 | 9,6  | 1,068                                    | K36×25×9,7  | 2                      |
| 1,3248                                 | 3,45   | 0,385                                    | K15×7×4,8  | 2                      | 13,0176                                | 11,3   | 1,152                                    | K44×28×7,2  | 2                      |
| 1,6588                                 | 5,8  | 0,286                                    | K24×13×5,2 | 1                      | 18,6224                                | 11,3   | 1,648                                    | K44×28×10,3 | 2                      |

2. Приведенные выражения позволили определить значения коэффициентов аппроксимации исходя из известных параметров магнитоэлектрических материалов, при этом аппроксимирующая кривая не выходит за пределы разброса экспериментально снятых зависимостей.

3. Предложенная инженерная методика расчета дросселей накопительных и сглаживающих фильтров импульсных стабилизаторов напряжения, а также трансформаторов однотактных преобразователей напряжения с обратным включением диода позволила за счет более эффективного использования энергонакопительных свойств магнитного материала уменьшить мощность активных потерь и габариты индуктивных элементов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Хаммер Д., Биггерс Дж. Технология толстопленочных гибридных интегральных схем. М., «Мир», 1975.

2. Баев Е. Ф. Индуктивные элементы с ферромагнитными сердечниками. М., «Сов. радио», 1976.

3. Chen D. Y., Harry A. O., Wilson T. G. Computer-aided design and graphics applied to the study of inductor energy-storage dc-to-dc electronic power convertors. „IEEE. Trans.“, 1973, vol. AES-9, N 4, p. 585—597.

4. Каретникова Е. И., Лукин А. В. Особенности проектирования дросселей для интегрально-гибридных ВИП. «Электронная техника в автоматике», 1980, вып. 11, с. 153 — 156.

5. Бландова Е. С., Калинина Т. Я. Проектирование дросселей фильтров на кольцевых магнитопроводах из Mo-пермаллоя. «Электронная техника», сер. «Радиодетали и радиокомпоненты», 1980, вып. 2 (39), с. 48 — 51.

6. Игнатъев Б. А. Алгоритм и программа проектирования оптимальных накопительных дросселей с заданной нелинейностью для ключевых стабилизаторов напряжения. «Техника средств связи», сер. «Техника телевидения», 1981, вып. 6 (32), с. 95 — 99.

7. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. М., «Высшая школа», 1967.

8. Александров Ф. И., Сиваков А. Р. Импульсные полупроводниковые преобразователи и стабилизаторы постоянного напряжения. Л., «Энергия», 1970.

Статья поступила 30 марта 1983 г.