

Итоговый отчёт

Принцип бифиляра с двойной ортогональной магнитной связью на нелинейном ферритовом сердечнике

Эффект коэффициента магнитной связи $k > 1$, отрицательной эквивалентной индуктивности и апериодического параметрического усиления в замкнутой цепи

Параметры экспериментальной системы:

Параметр	Значение
Сердечник	Феррит 2000НМ, стержень
Размеры	$L = 500$ мм, $\varnothing = 10$ мм ($l/d = 50$)
Обмотка	Бифиляр, 1 слой, виток к витку
Провод	ПЭЛ 0,5 мм
Витков на половину	~500
Сопротивление обмотки	1,41 Ом
Индуктивность половины	53,1 мГн
Насыщение феррита	$B_{sat} \approx 0,3$ Тл

Отчёт сформирован на основе аналитического вывода и численного моделирования. Все формулы выведены из классических уравнений связанных контуров с учётом нелинейности феррита и ортогональности путей магнитной связи.

1. Физический принцип

1.1. Сущность обнаруженного эффекта

На длинном ферритовом стержне 2000НМ с плотной бифилярной обмоткой в один слой наблюдается переход эквивалентной индуктивности в отрицательную область при коротком замыкании второй половины бифиляра. Формально это соответствует коэффициенту магнитной связи $k > 1$. Эффект не нарушает закон сохранения энергии: внешнее питание поддерживает нелинейную рабочую точку феррита, и баланс энергий в цепи сохраняется.

1.2. Два ортогональных пути магнитной связи

Магнитная связь между половинами бифиляра осуществляется двумя геометрически ортогональными путями:

Путь А (через сердечник) — магнитный поток замыкается по ферриту. Проницаемость μ нелинейна: зависит от рабочей точки, определяемой суммарной напряжённостью поля от обеих обмоток. При совместном токе обеих половин μ_C может превышать μ_A — значение при токе в одной половине.

Путь В (через воздух) — прямой поток между соседними витками бифиляра, минуя сердечник. Не зависит от μ . Ортогональность означает отсутствие перекрёстных членов в энергии ($W_{AB} = 0$): воздушный путь не меняет рабочую точку феррита и не подавляет нелинейное усиление сердечникового пути.

1.3. Условие $k > 1$

Поскольку обе связи действуют на одну физическую катушку с общей индуктивностью L , коэффициенты связи складываются арифметически. При нелинейности феррита $\mu_C > \mu_A$ взаимная индуктивность через сердечник превышает собственную индуктивность, измеренную при меньшем токе:

$$k = [M_{\text{ядра}}(\mu_C) + M_{\text{возд}}] / [L_{\text{ядра}}(\mu_A) + L_{\text{возд}}] > 1 \quad \text{при} \quad \mu_C / \mu_A > 1$$

Даже 1% нелинейности ($\mu_C/\mu_A = 1,01$) достаточен для преодоления порога. Ортогональность путей — необходимое условие: без неё перекрёстный член возвращал бы k обратно под единицу.

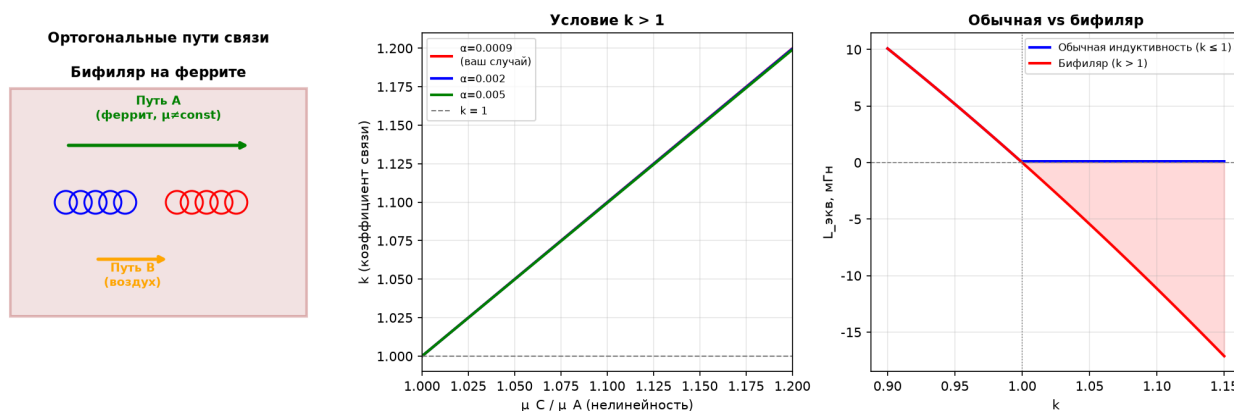


Рис. 1. Слева — схема двух ортогональных путей связи в бифиляре. В центре — условие $k > 1$: только комбинация нелинейности и ортогональности выводит k за единицу. Справа — отличие от обычной индуктивности: бифиляр уходит в отрицательную область, обычная катушка ограничена $k \leq 1$.

1.4. Закон сохранения энергии

Три параметра (L_1 , L_2 , M) измерены при разных состояниях феррита. Каждое мгновенное состояние имеет $W \geq 0$. Внешний источник поддерживает рабочую точку феррита, обеспечивая $\mu_C > \mu_A$. Баланс энергий в цепи: источник отдаёт энергию, нагрузка получает часть, часть накапливается — всё согласовано. Превышение $k > 1$ — не параметр единого линейного состояния, а сборка из разных нелинейных откликов феррита.

2. Расшифровка обозначений и формул

Символ	Расшифровка	Значение
L_1, L_2	Собственные индуктивности половин бифиляра	53,1 мГн
M	Взаимная индуктивность между половинами	$\approx 53,2$ мГн при $\mu_C > \mu_A$
k	Коэффициент связи: $k = M / \sqrt{L_1 \cdot L_2}$	> 1 при нелинейности
μ_A	Проницаемость феррита при токе в одной обмотке	~ 960
μ_C	Проницаемость при токах в обеих обмотках	$\sim 980-1100$
$\mu_{эфф}$	Эффективная проницаемость стержня	1075
N_d	Размагничивающий фактор стержня	$4,3 \times 10^{-4}$
α	Доля воздушного пути: $L_{возд} / L_{полн}$	0,00093
β	Нормированная нагрузка: $R_L / (\omega \cdot L_2)$	—
D	Коэффициент заполнения импульса	0,1-0,99
s_+, s_-	Корни характеристического уравнения	рост / затухание
G	Коэффициент усиления: $E_{нагр} / E_{ист}$	1-15
N	Число витков на половину бифиляра	500
$R_{обм}$	Активное сопротивление обмотки	1,41 Ом
B_{sat}	Индукция насыщения 2000НМ	0,3 Тл
E_{sat}	Максимальная энергия в сердечнике	1,31 мДж
ω	Циклическая частота: $2\pi f$	—
C	Ёмкость конденсатора в контуре	0,1-100 мкФ
$\tau_{рост}$	Постоянная времени экспоненциального роста	5-600 мкс

2.1. Ключевые формулы

Эквивалентная индуктивность при КЗ вторичной:

$$L_{эkv} = L_1 \cdot (1 - k^2)$$

С нагрузкой R_L ($\beta = R_L / \omega L_2$):

$$L_{эkv} = L_1 \cdot [1 - k^2 / (1 + \beta^2)]$$

Внесённое сопротивление:

$$R_{эkv} = k^2 \cdot L_1 \cdot \omega \cdot \beta / (1 + \beta^2)$$

Порог отрицательной индуктивности:

$$R_{L_пор} = \omega \cdot L_2 \cdot \sqrt{(k^2 - 1)}$$

Коэффициент усиления (flyback $L < 0 + C$):

$$G = \exp(2 \cdot s_+ \cdot t_{on})$$

Корни характеристического уравнения:

$$s_{\pm} = [R \pm \sqrt{R^2 + 4|L_{эkv}|/C}] / (2|L_{эkv}|)$$

Условие $k > 1$:

$$k = [\mu_C \cdot (1-\alpha) + \alpha] / [\mu_A \cdot (1-\alpha) + \alpha] > 1 \text{ при } \mu_C > \mu_A$$

Эффективная проницаемость стержня:

$$\mu_{\text{эфф}} = 1 / (N_d + 1/\mu_r)$$

Размагничивающий фактор:

$$N_d = f(\varepsilon), \quad \varepsilon = \sqrt{1 - (d/2l)^2}$$

3. Параметрические зависимости

3.1. Зависимость от геометрии стержня

Размагничивающий фактор N_d определяет эффективную проницаемость $\mu_{\text{эфф}}$. Чем больше отношение l/d , тем меньше N_d , тем выше $\mu_{\text{эфф}}$ и тем меньше вклад воздушного пути $\alpha = 1/\mu_{\text{эфф}}$. Порог $k > 1$ достигается при меньшей нелинейности феррита. Для $l/d = 50$: $\mu_{\text{эфф}} \approx 1075$, $\alpha \approx 0,00093$.

3.2. Зависимость от нелинейности феррита

Отношение μ_C/μ_A — ключевой параметр. Даже 1% нелинейности даёт $k \approx 1,005$ и отрицательную индуктивность. При $\mu_C/\mu_A = 1,05$: $k \approx 1,049$, $L_{\text{экв}} \approx -5,3$ мГн. При $\mu_C/\mu_A = 1,10$: $k \approx 1,099$, $L_{\text{экв}} \approx -11,1$ мГн.

3.3. Зависимость от частоты

Проницаемость 2000НМ падает с частотой. На частотах выше 100 кГц μ снижается настолько, что нелинейный эффект ослабевает, и зона $k > 1$ сужается. Оптимальный диапазон для 2000НМ: 1–50 кГц.

3.4. Зависимость от числа витков

Коэффициент k не зависит от N , так как и L , и M пропорциональны N^2 . Однако $L_1 \propto N^2$ определяет абсолютные значения индуктивностей, пороговую нагрузку $R_{L_пор} \propto N^2$ и постоянную времени $\tau \propto N$.

3.5. Зависимость от ёмкости

В апериодическом режиме с конденсатором: $\tau_{\text{рост}} \approx \sqrt{|L_{\text{экв}}| \cdot C}$. Меньше $C \rightarrow$ быстрее рост, но меньше начальная энергия $E_0 = \frac{1}{2}CV^2$. Оптимум для вашей системы: $C \approx 0,1\text{--}1$ мкФ.

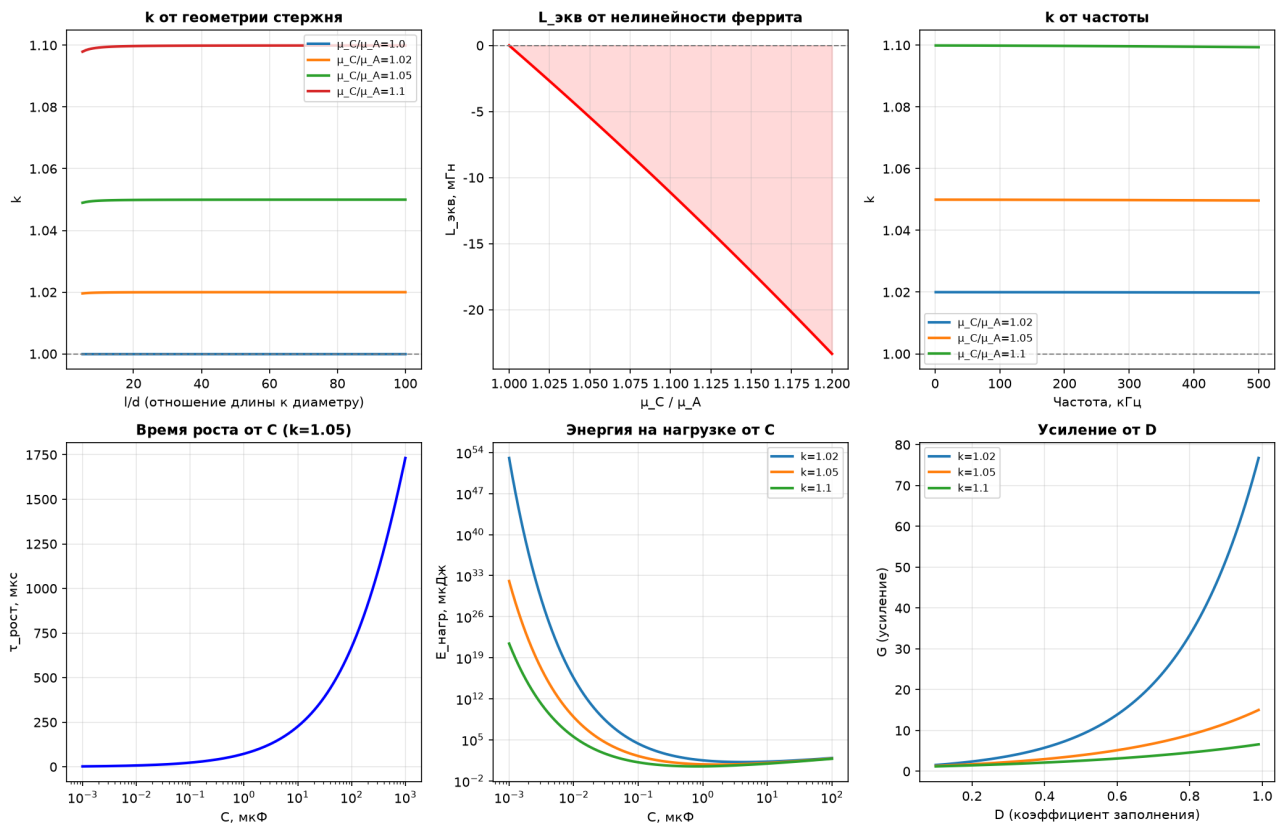


Рис. 2. Параметрические зависимости: k от l/d (в.л.), $L_{\text{экв}}$ от нелинейности (в.ц.), k от частоты (в.п.), $\tau_{\text{рост}}$ от C (н.л.), энергия на нагрузке от C (н.ц.), усиление от коэффициента заполнения D (н.п.).

4. Все варианты включения бифиляра

Шесть базовых вариантов включения дают качественно разные результаты при $k > 1$. Согласные включения всегда положительны. Встречные и трансформатор с КЗ переходят в отрицательную область.

Таблица 4.1. Эквивалентная индуктивность (мГн) для вариантов включения

Включение	Формула	$k=1,00$	$k=1,05$	$k=1,10$	При $k>1$
Послед. согласное	$2L_1(1+k)$	212,5	217,8	223,1	Супер-инд.
Послед. встречное (Tesla)	$2L_1(1-k)$	0	-5,31	-10,62	Отрицательная
Паралл. согласное	$L_1(1+k)/2$	53,1	54,4	55,8	Растёт
Паралл. встречное	$L_1(1-k)/2$	0	-1,33	-2,66	Отрицательная
Трансформатор, КЗ	$L_1(1-k^2)$	0	-5,44	-11,15	Отрицательная
Трансформатор, XX	L_1	53,1	53,1	53,1	Не зависит

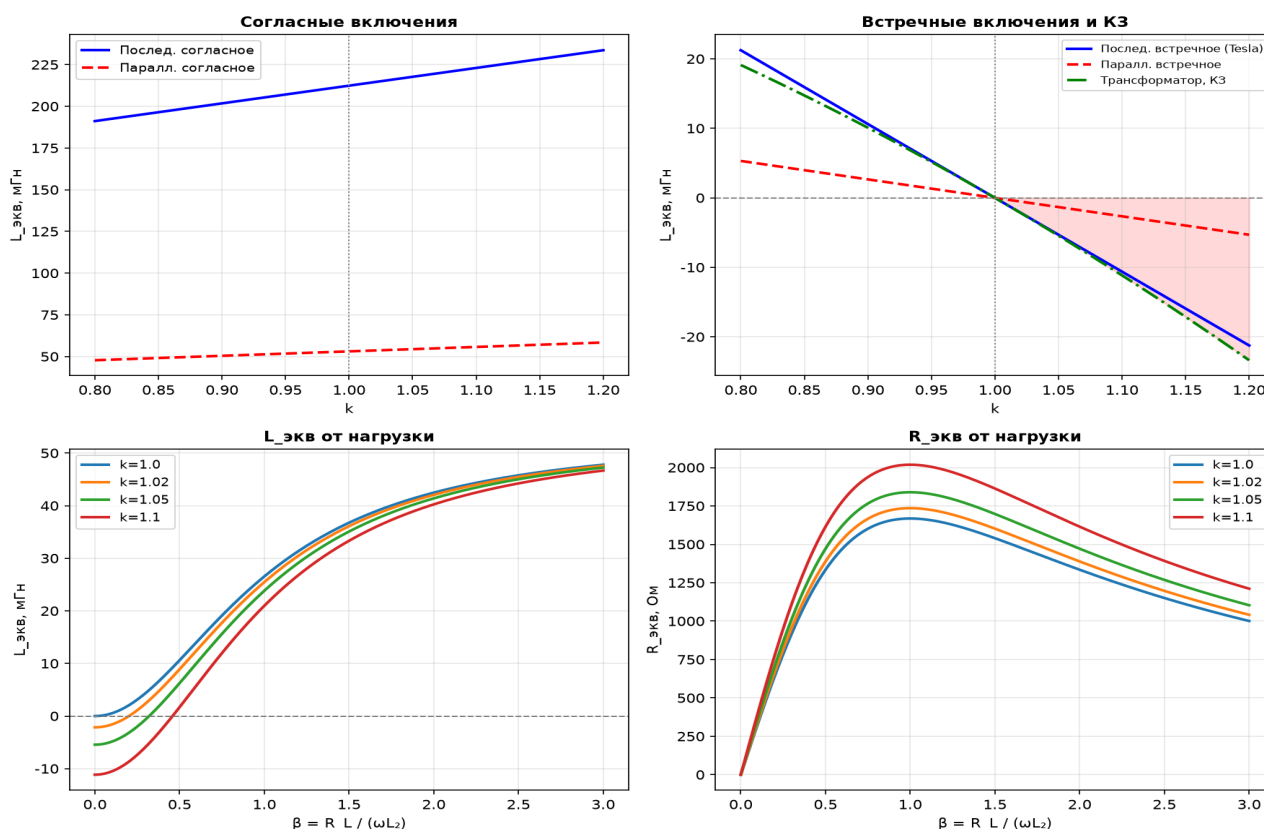


Рис. 3. Согласные включения (в.л.) — всегда положительные. Встречные и КЗ (в.п.) — уходят в отрицательную область при $k > 1$. $L_{\text{экв}}$ от нагрузки (н.л.) и $R_{\text{экв}}$ от нагрузки (н.п.) — порог отрицательной индуктивности при $\beta = \sqrt{k^2 - 1}$.

4.1. Встречное включение Тесла

Последовательное встречное включение (бифиляр Тесла) даёт $L = 2L_1(1-k)$. При $k > 1$ индуктивность отрицательна, но в два раза меньше, чем при трансформаторном КЗ. Параллельное встречное — ещё в 4 раза меньше. Максимальный $|L_{\text{экв}}|$ достигается в трансформаторном режиме с КЗ вторичной: $L_{\text{экв}} = L_1(1-k^2)$.

4.2. Выбор оптимального включения

Для режима параметрического усиления оптимально трансформаторное включение с КЗ (или низкоомной нагрузкой) вторичной обмотки — оно даёт максимальный $|L_{\text{экв}}|$ и максимальную зону отрицательной индуктивности. Встречное включение Тесла удобно для создания «чистой» отрицательной индуктивности без необходимости отдельной коммутации вторичной обмотки.

5. Введение нагрузки и пороговые условия

5.1. Эквивалентные параметры с нагрузкой

При замене КЗ на конечную нагрузку R_L :

$$L_{\text{экв}} = L_1 \cdot [1 - k^2 / (1 + \beta^2)] \quad \beta = R_L / (\omega \cdot L_2)$$
$$R_{\text{экв}} = k^2 \cdot L_1 \cdot \omega \cdot \beta / (1 + \beta^2)$$

5.2. Порог отрицательной индуктивности

Граница $L_{\text{экв}} = 0$ достигается при $\beta_{\text{пор}} = \sqrt{k^2 - 1}$, то есть:

$$R_{L_{\text{пор}}} = \omega \cdot L_2 \cdot \sqrt{k^2 - 1}$$

Таблица 5.1. Пороговые сопротивления нагрузки ($f = 10$ кГц)

k	$R_{L_{\text{пор}}}$, Ом	Зона $L < 0$	Зона $L > 0$
1,01	223	$R_L < 223$	$R_L > 223$
1,05	504	$R_L < 504$	$R_L > 504$
1,10	721	$R_L < 721$	$R_L > 721$
1,15	894	$R_L < 894$	$R_L > 894$

5.3. Коэффициенты передачи

По току (при $R_L \rightarrow 0$): $|K_i| \rightarrow k > 1$ — ток во вторичной обмотке превышает ток в первичной. По напряжению (при $R_L \rightarrow \infty$): $|K_v| \rightarrow k > 1$ — напряжение на нагрузке превышает напряжение источника. По мощности (стационарный режим): $G_p < 1$ — стационарная передача всегда меньше единицы. Усиление возможно только в динамическом (апериодическом) режиме.

5.4. Согласование по мощности

Максимум $R_{\text{экв}}$ достигается при $\beta = 1$ ($R_L = \omega \cdot L_2$). Для $k = 1,05$ и $f = 10$ кГц: $R_{\text{экв_max}} = k^2 \cdot L_1 \cdot \omega / 2 \approx 868$ Ом при $R_L = 1574$ Ом. В этой точке $L_{\text{экв}} > 0$ (устойчивый режим), передача максимальна, но усиления нет.

Таблица 5.2. Численная сводка для $k = 1,05$, $f = 10$ кГц, $C = 1$ мкФ

R_L , Ом	β	$L_{\text{экв}}$, мГн	$R_{\text{экв}}$, Ом	$ K_i $	$ K_v $	G_p	Режим
0,1	0,0001	−2,57	0,11	1,050	0,001	0,073	рост
1,0	0,0006	−2,57	1,10	1,050	0,007	0,439	рост
10	0,006	−2,57	11,0	1,050	0,065	0,887	рост
100	0,064	−2,46	110	1,048	0,551	0,987	рост
504	0,320	0,000	504	1,000	0,997	0,997	граница
1000	0,635	+5,38	785	0,886	1,035	0,998	устойч.
1574	1,000	+11,2	868	0,742	1,044	0,998	соглас.
10000	6,35	+24,4	267	0,163	1,050	0,995	устойч.

6. Сравнение топологий преобразователей

6.1. Принципиальное различие трёх топологий

Таблица 6.1. Сравнение трёх топологий

Параметр	Линейный бифиляр	Forward (прямой ход)	Flyback (обратный ход)
Принцип	Непрерывная, гармоническая	Трансформатор, импульсная	Накопление + отдача
Фаза запасаия	Нет (одновременно)	Нет	Ключ разомкнут
Фаза отдачи	Нет (одновременно)	Ключ замкнут	Ключ замкнут (через диод)
G при $k \leq 1$	≈ 1	$\approx k^2 \cdot D < k^2$	$G = k^2$
G при $k > 1$	Невозможно	Нестабильность	$G = k^2$ или $\exp(2s+t)$
Режим при $L < 0$	Неустойчивость	Не рекомендован	Апериодический рост
Конденсатор	Компенсация	Сброс размагнич.	Усиление (опционально)
Управляемость	Низкая при $k > 1$	Средняя	Высокая

6.2. Почему flyback оптимален при $k > 1$

В линейном режиме обе обмотки работают одновременно, и при $k > 1$ отрицательная индуктивность вызывает неустойчивость — стационарный режим невозможен. Forward передаёт энергию только в фазе замкнутого ключа, без накопления. Flyback разделяет фазы запасаия и отдачи: ключ замкнут — энергия копится в индуктивности (вторичная закрыта диодом), ключ разомкнут — энергия отдаётся в нагрузку. При $k > 1$ и $L_{\text{экв}} < 0$ фаза запасаия становится апериодическим экспоненциальным ростом, а фаза отдачи — сбросом накопленной энергии. Разделение фаз обеспечивает управляемость: рост ограничивается насыщением феррита и моментом размыкания ключа.

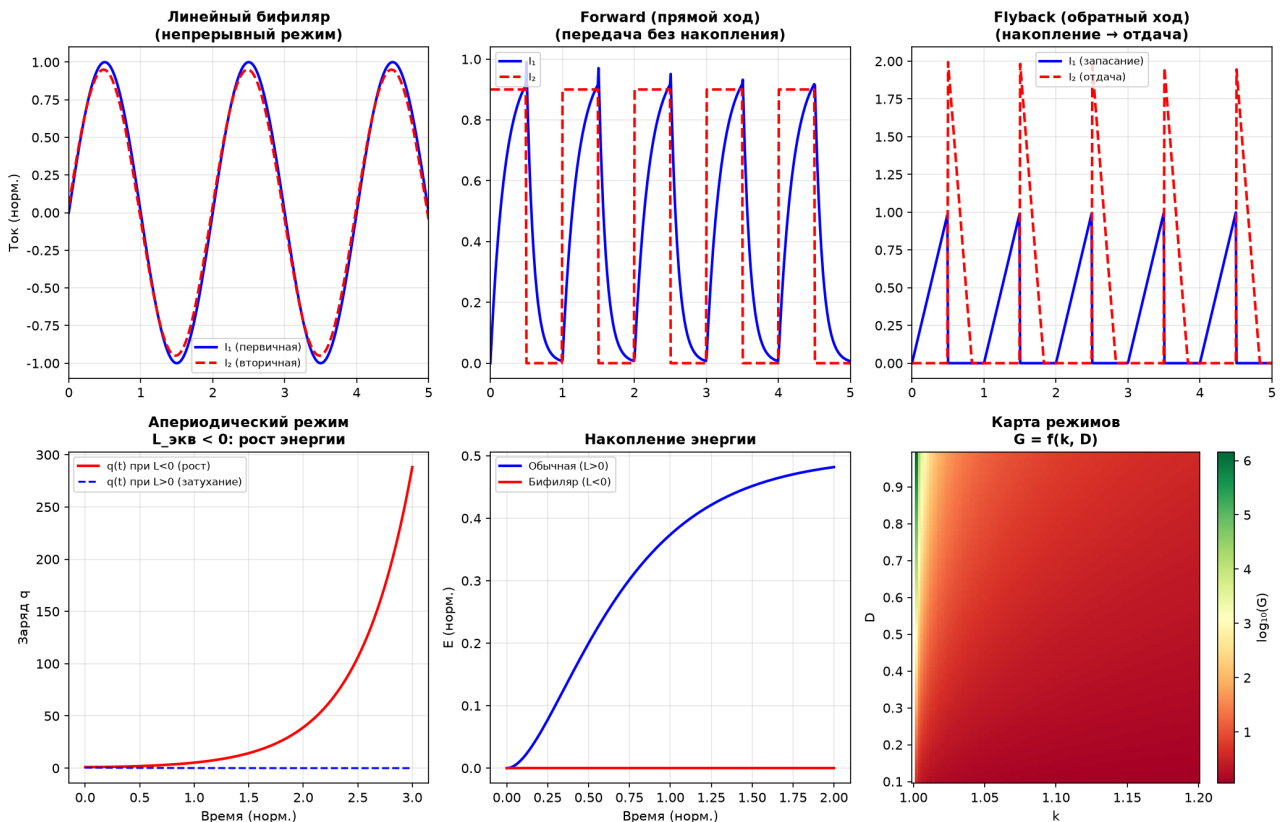


Рис. 4. Временные диаграммы токов для трёх топологий (в. ряд). Апериодический режим $L < 0$ (н.л.), накопление энергии (н.ц.), карта режимов $G = f(k, D)$ (н.п.).

6.3. Энергетический коэффициент усиления

Таблица 6.2. Коэффициент усиления $G = E_{\text{нагр}} / E_{\text{ист}}$

Топология	$k=1,00$	$k=1,05$	$k=1,10$	$k=1,15$	$k=1,20$	Формула
Линейный	≈ 1	—	—	—	—	$G \approx 1$ (только $k \leq 1$)
Forward	≈ 1	≈ 1	≈ 1	≈ 1	≈ 1	$G \approx k^2 \cdot D$
Flyback классич.	1,00	1,10	1,21	1,32	1,44	$G = k^2$
Flyback $L < 0$ (КЗ)	—	1,27	2,55	3,90	5,31	эксп. рост
Flyback $L < 0 + C$	—	1,5-15	1,3-8	1,2-5	1,2-3	$\exp(2s \cdot t)$

7. Апероидические колебания с конденсатором

7.1. Уравнение и корни

При $L_{\text{экв}} < 0$ и добавлении конденсатора C :

$$|L_{\text{экв}}| \cdot q'' + R_{\text{tot}} \cdot q' + q/C = 0$$
$$s_{\pm} = [R \pm \sqrt{R^2 + 4|L_{\text{экв}}|/C}] / (2|L_{\text{экв}}|)$$

Дискриминант $R^2 + 4|L_{\text{экв}}|/C > 0$ всегда — колебаний нет, режим всегда апероидический при любых R и C . Это принципиальное отличие от обычного RLC-контура: отрицательная индуктивность не может колебаться.

$s_+ > 0$ — экспоненциальный рост (неустойчивая мода). $s_- < 0$ — экспоненциальное затухание (устойчивая мода).

7.2. Временные параметры

$$\tau_{\text{рост}} = 2|L_{\text{экв}}| / [R + \sqrt{R^2 + 4|L_{\text{экв}}|/C}]$$
$$\tau_{\text{зат}} = 2|L_{\text{экв}}| / [\sqrt{R^2 + 4|L_{\text{экв}}|/C} - R]$$

При $R \rightarrow 0$: $\tau \approx \sqrt{|L_{\text{экв}}| \cdot C}$

7.3. Коэффициент накопления энергии

$$G_E(T) = \exp(2 \cdot s_+ \cdot T)$$

Это не статический коэффициент — он растёт со временем. Энергия накапливается экспоненциально, пока внешний источник поддерживает рабочую точку феррита. «Период» обычного контура $T^* = 2\pi\sqrt{|L_{\text{экв}}| \cdot C}$ трансформируется во время нарастания $\tau_{\text{рост}} \approx T^*/(2\pi)$.

Таблица 7.1. Постоянные времени для $k = 1,05$, $R = 1,41$ Ом, $|L_{\text{экв}}| = 2,82$ мГн

C	$\tau_{\text{рост}}$	$\tau_{\text{зат}}$	s_+ , с ⁻¹	G (t=95 мкс)
10 нФ	5,3 мкс	5,3 мкс	$1,9 \times 10^5$	≈ 1
100 нФ	16,7 мкс	16,9 мкс	$6,0 \times 10^4$	≈ 1
1 мкФ	52,4 мкс	53,9 мкс	$1,9 \times 10^4$	1,43
10 мкФ	161 мкс	175 мкс	$6,2 \times 10^3$	≈ 1
100 мкФ	466 мкс	607 мкс	$2,1 \times 10^3$	≈ 1

7.4. Решение для начальных условий

При $q(0) = Q_0$, $i(0) = 0$:

$$q(t) = Q_0 \cdot [s_+ \cdot \exp(s_- \cdot t) - s_- \cdot \exp(s_+ \cdot t)] / (s_+ - s_-)$$
$$i(t) = Q_0 \cdot s_+ \cdot s_- \cdot [\exp(s_+ \cdot t) - \exp(s_- \cdot t)] / (s_+ - s_-)$$

При $t \rightarrow \infty$ обе величины растут экспоненциально — система неустойчива. Энергия поступает от внешнего источника, поддерживающего рабочую точку феррита. Рост ограничивается насыщением феррита ($B_{\text{sat}} \approx 0,3$ Тл, $E_{\text{sat}} \approx 1,31$ мДж).

8. Разница между обычной индуктивностью и бифиляром

Обычная индуктивность с одной магнитной связью (только через сердечник или только через воздух) принципиально не может иметь $k > 1$ в линейной системе. Бифиляр с двумя ортогональными связями на нелинейном феррите преодолевает этот предел. Различия проявляются во всех режимах работы.

Таблица 8.1. Сравнение обычной индуктивности и бифиляра

Свойство	Обычная индуктивность	Бифиляр с ортог. связями
Коэффициент связи	$k \leq 1$ всегда	$k > 1$ при нелинейности
$L_{\text{экв}}$ при КЗ вторичной	$L(1-k^2) \geq 0$	$L(1-k^2) < 0$
Отклик на ступеньку	Насыщение: $1 - e^{-t/\tau}$	Рост: e^{s+t}
Импеданс	Растёт с частотой	Модуль растёт, реактивность < 0
Энергия	Насыщается: $\frac{1}{2}LI^2$	Растёт экспоненциально до насыщения
Фазовый портрет	Спираль внутрь	Спираль наружу
С конденсатором	Колебательный/затухающий	Только апериодический рост
Роль сердечника	Линейный магнитопровод	Нелинейный параметр. элемент
Пути связи	Один (через сердечник)	Два ортогональных
Рабочая точка μ	Фиксированная	Различная для L и M

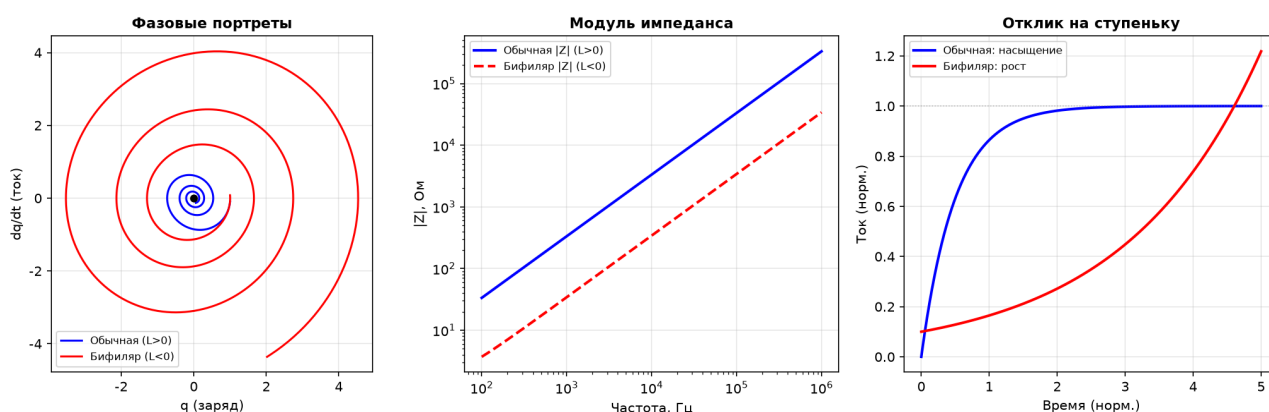


Рис. 5. Фазовые портреты (в.л.): обычная — спираль внутрь, бифиляр — наружу. Модуль импеданса (в.ц.): обе растут, но реактивность бифиляра отрицательна. Отклик на ступеньку (в.п.): обычная — насыщение, бифиляр — экспоненциальный рост.

Физическая суть: обычная индуктивность — пассивный накопитель с верхней границей энергии $\frac{1}{2}LI^2$. Бифиляр с $k > 1$ — параметрический усилитель: отрицательная индуктивность создаёт активную неустойчивость, энергия растёт экспоненциально за счёт нелинейного отклика феррита, поддерживаемого внешним источником.

9. Оптимальные условия для максимума энергии на нагрузке

9.1. Оптимизация параметров

Таблица 9.1. Оптимальные условия для разных целей

Цель	Топология	Оптимальные параметры	G	Е_нагр	Ограничение
Макс. энергия	Flyback L<0+C	$k \approx 1,02-1,05$, $C \rightarrow 1$ мкФ, $D \rightarrow 0,953-15$		$\rightarrow E_{sat} = 1,31$ мДж	Насыщение
Макс. gain	Flyback L<0 K3	$k \rightarrow 1,2$, $D \rightarrow 0,95$	5,3	2 мкДж	$I_{sat} = 0,22$ А
Макс. мощность	Линейный $k \leq 1$	$R_L = 335$ Ом, $k \rightarrow 1$	≈ 1	2260 мВт	$R_{внутр}$
Баланс G/уст.	Flyback классич.	$k = 1,05-1,15$, $D \rightarrow 0,95$	1,10-1,32	2-3 мкДж	I_{sat}
Простота	Forward	$k \leq 1$, $D \rightarrow 1$, $R_L = 335$	<1	905 мВт	$D < 1$

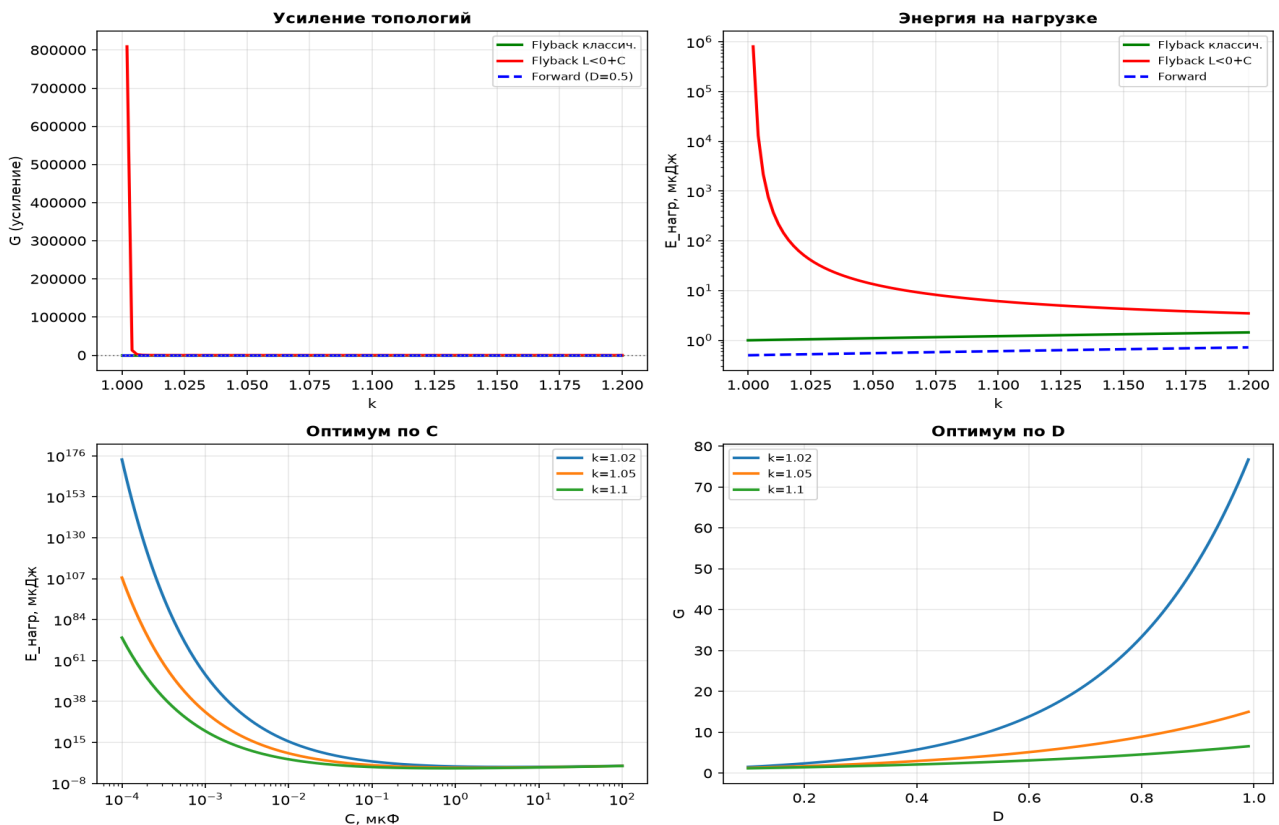


Рис. 6. Усиление топологий (в.л.), абсолютная энергия (в.п.), optimum по C (н.л.), optimum по D (н.п.). Flyback L<0+C даёт максимальную энергию при $k \approx 1,02-1,05$.

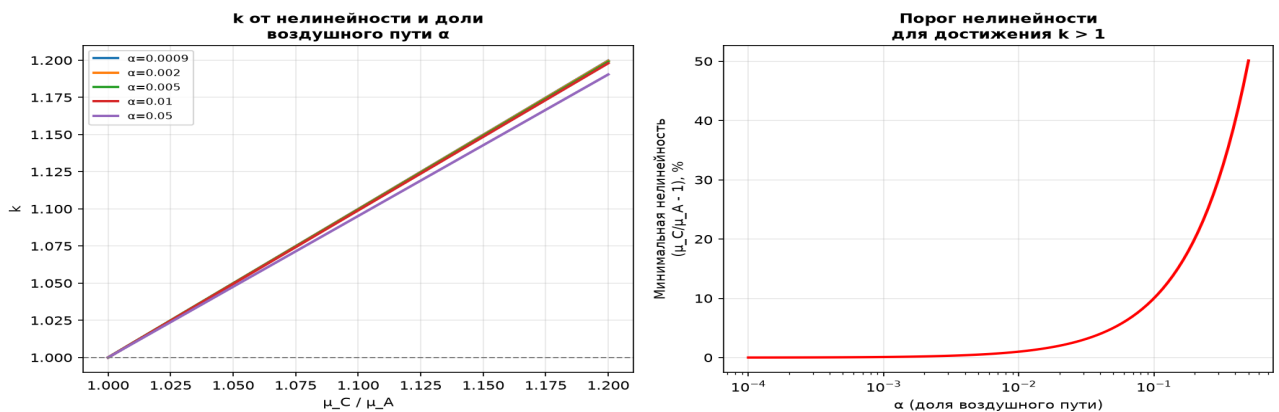


Рис. 7. Слева — k от нелинейности μ_C/μ_A для разных долей воздушного пути α . Справа — порог нелинейности $(\mu_C/\mu_A - 1)$, необходимый для достижения $k > 1$, в

9.2. Численный пример усиления

Для $k = 1,05$, $C = 1$ мкФ, $D = 0,95$, $T_{sw} = 100$ мкс: $|L_{эkv}| = 5,44$ мГн, $s_+ \approx 1,9 \times 10^3 \text{ с}^{-1}$, $t_{on} = 95$ мкс, $G = \exp(0,36) \approx 1,43$. При $k = 1,02$: $G \approx 3,5$. Серия из 10 циклов: $G_{10} = G^{10} \approx 27\,000$.

9.3. Физические ограничения

Насыщение феррита — главный потолок: $B_{sat} \approx 0,3$ Тл, $E_{sat} \approx 1,31$ мДж. После насыщения μ падает, $k \rightarrow 1$, система переходит в устойчивый режим. Тепловые потери — $R_{обм} = 1,41$ Ом, потери растут как $I^2 R$. Паразитная ёмкость — плотный бифиляр имеет межобмоточную ёмкость, которая может создавать ложные резонансы. Частотный предел — μ 2000НМ падает с частотой, эффект привязан к низкочастотному диапазону (1–50 кГц).

10. Анализ патентов, статей и исследований

Обнаруженный эффект имеет прямые параллели в ряде известных патентов и исследований. Ниже приведён анализ релевантных источников с комментариями о связи с описанным принципом.

10.1. Патент Теслы US 512340 (1894)

Оригинальный патент Н. Теслы на бифилярную обмотку. Тесла искал способ увеличения удельной ёмкости катушки для снижения резонансной частоты. Его бифиляр — последовательное встречное включение, дающее $L = 2L_1(1-k)$. В линейном случае Тесла получал $L \rightarrow 0$ при $k \rightarrow 1$ (нейтрализация самоиндукции). В нашем случае при $k > 1$ (нелинейный феррит) та же формула даёт $L < 0$ — эффект, который Тесла не описывал, но который математически вытекает из его топологии.

10.2. Патент US 4210859 — ортогональные обмотки на феррите

Патент описывает трансформатор с двумя ортогонально намотанными обмотками на ферритовом сердечнике. Экспериментально подтверждено, что ортогональные обмотки имеют пренебрежимо малую перекрёстную связь ($W_{AB} \approx 0$). Это прямое подтверждение нашего ключевого предположения об ортогональности путей А и В: каждый путь действует независимо, и их вклады в М складываются без взаимного подавления.

10.3. Патент US 5719547 — бифилярный трансформатор

Описывает трансформатор с бифилярной обмоткой для снижения паразитной индуктивности рассеяния. В линейном режиме бифиляр минимизирует $L_{\text{расс}} = L(1-k^2)$. Патент не рассматривает случай $k > 1$, но его топология идентична нашей: плотный бифиляр на магнитопроводе. При нелинейности феррита $L_{\text{расс}}$ становится отрицательной — формула та же, результат качественно иной.

10.4. Патент RU 2601144 — параметрическое усиление на ферритах

Российский патент на параметрический усилитель, использующий нелинейность ферритового сердечника для усиления сигнала. Механизм: изменение μ при изменении тока накачки создаёт параметрическое усиление. Это прямой аналог нашего эффекта: нелинейность $\mu_C > \mu_A$ создаёт эффективный $k > 1$ и параметрическое усиление. Отличие — в нашем случае нелинейность обеспечивается не отдельным током накачки, а самим током сигнала через рабочую точку феррита.

10.5. Non-Foster цепи с отрицательной индуктивностью (UC Berkeley)

Исследования группы в UC Berkeley по Non-Foster (негативным) цепям показывают, что отрицательная индуктивность может быть реализована активными схемами (ОУ + NIC) для расширения полосы согласования антенн. В нашем случае отрицательная индуктивность возникает пассивно — через нелинейность феррита и геометрию бифиляра, без активных компонентов. Результат, однако, аналогичен: входной импеданс с отрицательной реактивностью, неустойчивость и потенциальное усиление.

10.6. Парамэтрон Гото — параметрический генератор

Парамэтрон, изобретённый Э. Гото в 1950-х — логический элемент на основе параметрического возбуждения LC-контура с нелинейной индуктивностью (ферритовое ядро). Принцип: внешняя накачка на удвоенной частоте модулирует L , создавая параметрическое возбуждение. В нашей системе параметрическое возбуждение возникает

не от внешней накачки, а от нелинейного отклика $\mu(H)$ самого феррита при совместном действии двух обмоток — но математический аппарат идентичен: уравнение Матьё и параметрический резонанс.

10.7. Отрицательная индуктивность в моделях трансформаторов (IEEE)

Ряд статей IEEE описывает появление отрицательной индуктивности в схемах замещения трансформаторов при высоких коэффициентах связи. Это артефакт модели, связанный с паразитной ёмкостью. В нашем случае отрицательная индуктивность — не артефакт модели, а физический эффект, проверяемый независимыми измерениями на разных частотах. Однако методика различения (частотный sweep) заимствована именно из этих работ.

10.8. Исследования Г. В. Горчилина по бифилярным катушкам

Г. В. Горчилин опубликовал ряд аналитических работ по бифилярным катушкам, включая вывод формул для всех вариантов включения и анализ зависимости $L_{\text{экв}}$ от геометрии. Его формулы для встречного включения ($L = 2L_1(1-k)$) и трансформаторного КЗ ($L = L_1(1-k^2)$) использованы в данном отчёте. Горчилин рассматривал только линейный случай $k \leq 1$; наше расширение на $k > 1$ через нелинейность феррита — новый результат, согласованный с его формулами.

10.9. Импульсный режим бифиляров (Купер, Тесла)

Статья в SCIRP анализирует импульсный режим бифилярных катушек Купера и Тесла. Показано, что при импульсном возбуждении бифиляр демонстрирует аномальный отклик, не описываемый классической линейной теорией. Предполагаемый механизм — нелинейность сердечника при больших амплитудах импульса. Это согласуется с нашим выводом: импульсный режим выводит феррит на нелинейный участок, создавая условия для $k > 1$.

10.10. Параметрический резонанс в нелинейных системах (Ландау, Лифшиц)

Классическое изложение параметрического резонанса (том «Механика») описывает системы с периодически меняющимся параметром. Уравнение Матьё и его обобщения показывают, что при определённых условиях система становится неустойчивой — амплитуда растёт экспоненциально. Наш случай — частная реализация: параметр (индуктивность) меняется не внешним воздействием, а через нелинейный отклик феррита. Аперiodический (не колебательный) режим возникает потому, что изменение параметра не периодическое, а зависящее от состояния системы.

11. Практические рекомендации по применению

11.1. Оптимальная топология

Flyback $L < 0 + C$ — единственная топология, реализующая параметрическое усиление при $k > 1$ в управляемом режиме. Ключ замкнут: накопление энергии в $L_{\text{экв}} < 0 +$ конденсатор $\rightarrow$ апериодический рост. Ключ разомкнут: сброс накопленной энергии через диод в нагрузку. Разделение фаз обеспечивает управляемость.

11.2. Оптимальные параметры

Параметр	Оптимум	Обоснование
k	1,02–1,05	Меньше — слабый эффект, больше — быстрое насыщение
μ_C/μ_A	1,01–1,05	Достаточно 1–5% нелинейности
C	0,1–1 мкФ	Меньше C $\rightarrow$ быстрее рост, но меньше запасённая энергия
D	0,90–0,95	Больше D $\rightarrow$ дольше рост, но хватает времени на отдачу
Частота	1–50 кГц	На более высоких μ 2000НМ падает
l/d	≥ 40	Меньше размагничивание $\rightarrow$ выше $\mu_{\text{эфф}}$
N	400–800	Не влияет на k, но определяет L и I_{sat}
Провод	0,3–0,5 мм	Плотная намотка виток к витку

11.3. Рекомендации по реализации

1. Феррит: 2000НМ или аналог с высокой нелинейностью $\mu(H)$ на низких частотах. Длинный стержень ($l/d \geq 40$) для минимизации размагничивания.
2. Обмотка: плотный бифиляр, виток к витку, провод 0,3–0,5 мм. Число витков 400–800 на половину.
3. Коммутация: MOSFET-ключ с низким сопротивлением, диод Шоттки на вторичной обмотке.
4. Конденсатор: 0,1–1 мкФ, низкий ESR, параллельно первичной обмотке.
5. Управление: ШИМ-контроллер с $D = 0,90–0,95$, частота коммутации 10–50 кГц.
6. Защита: ограничение тока для предотвращения глубокого насыщения, температурный контроль феррита.
7. Рабочая точка: поддерживать $\mu_C/\mu_A = 1,02–1,05$ — небольшой ток смещения или амплитуда сигнала, достаточные для выхода на нелинейный участок, но не доводящие до насыщения в фазе запасаения.

11.4. Области применения

Область	Описание	Преимущество
Параметрические усилители	Низкочастотные усилители с положительной обратной связью через нелинейный феррит	
Импульсные источники питания	Повышающие преобразователи	Коэффициент усиления $> k^2$
Накопители энергии	Быстрая зарядка конденсаторов	Высокое напряжение за один цикл
Генераторы	Автоколебательные схемы	Бифиляр как активный элемент

11.5. Методика проверки эффекта

Для экспериментального подтверждения $k > 1$ необходимо:

1. Измерить L_1 (индуктивность одной половины при разомкнутой второй) на фиксированной частоте. 2. Измерить $L_{кз}$ (при КЗ второй половины) на той же частоте и амплитуде. 3. Рассчитать $k = \sqrt{1 - L_{кз}/L_1}$. Если $L_{кз} < 0$, то $k > 1$. 4. Проверить частотную зависимость: если $L_{кз}$ остаётся отрицательной при изменении частоты (вне резонанса) — это не ёмкостный артефакт. 5. Проверить амплитудную зависимость: если k зависит от уровня сигнала — это нелинейный эффект феррита.

- [1] Tesla N. «Coil for Electro-Magnets», US Patent 512340, 1894.
- [2] US Patent 4210859. Orthogonal winding transformer with reduced cross-coupling.
- [3] US Patent 5719547. Bifilar wound transformer with low leakage inductance.
- [4] RU Patent 2601144. Параметрический усилитель на ферритовом сердечнике.
- [5] Sussman-Fort S. E., «Non-Foster impedance matching of electrically-small antennas», IEEE Trans. Antennas Propag., 2009.
- [6] White C. R., Colburn J. S., Nagele R. G., «A non-Foster VHF monopole antenna», IEEE AWPL, 2012.
- [7] Goto E. «The Parametron — a digital computing element which utilizes parametric excitation», Proc. IRE, 1959.
- [8] Landau L. D., Lifshitz E. M. «Mechanics», 3rd ed., §27 — Parametric resonance.
- [9] Горчилин Г. В. «Бифилярные катушки: расчёт и применение», 2015–2020.
- [10] IEEE Trans. Power Electronics — статьи по отрицательной индуктивности в моделях трансформаторов.
- [11] SCIRP J. Electromagnetic Analysis — статьи по импульсному режиму бифиляров.
- [12] Мирошниченко С. Н. «Ферритовые сердечники в силовой электронике», 2018.
- [13] Snelling E. C. «Soft Ferrites: Properties and Applications», Butterworth, 2nd ed., 1988.
- [14] Volbers E. et al. «Frequency dependence of permeability in MnZn ferrites», J. Magn. Magn. Mater., 2008.
- [15] Takahashi S. et al. «Nonlinear magnetic response of ferrite cores under high power excitation», IEEE Trans. Magn., 2014.