

Бифилярные обмотки на нелинейном феррите: квантованный процесс, феррит-катализатор и неконтролируемые режимы

Научная статья

Аннотация. В работе исследуется компенсационный бифиляр на ферритовом стержне 2000НМ при коэффициенте связи $k > 1$, возникающем за счёт нелинейности феррита и ортогональности магнитных путей. Установлено, что ферритовый стержень выступает в роли катализатора: при коротком замыкании вторичной обмотки токи в половинах бифиляра встречны, и нетто-поле в феррите пропорционально разности токов $H_{\text{нетто}} = N \cdot I \cdot (1 - k) / l$. При $k \rightarrow 1+$ квант времени процесса $\tau = \sqrt{2L(k-1) \cdot C} \rightarrow 0$, а потолок энергии расходится как $1/(k-1)$. Детально разобраны неконтролируемые режимы и их последствия. Предложен безопасный режим на базе Flyback с конденсатором.

1. Терминология

Бифиляр — два провода, уложенные параллельно (виток к витку). Это технология намотки, а не режим работы.

Бифиляр Теслы — последовательное согласное включение: конец А соединён с началом В, токи сонаправлены. Цель — увеличение межвитковой ёмкости (патент US 512340, 1894).

Компенсационный бифиляр — встречное включение: соединяются одноимённые концы, токи противоположны. Цель — компенсация магнитного поля и получение $L_{\text{экв}} < 0$ при нелинейности феррита.

Внимание: «бифиляр Теслы» — только про согласное включение. Встречное включение — отдельный режим, не имеющий отношения к патенту Теслы.

2. Пояснительная таблица символов

Символ	Расшифровка	Ед.	Значение	Комментарий
L1, L2	Собственные индуктивности	Гн	53,1 мГн	$L1 = L2 = L$
M	Взаимная индуктивность	Гн	$k \cdot L$	Зависит от k
k	Коэффициент связи	—	1,00–1,15	> 1 при нелинейности
μ_r	Проницаемость феррита	—	900–1200	2000НМ, зависит от H
$\mu_{\text{эфф}}$	Эфф. проницаемость стержня	—	~1075	$1/(Nd + 1/\mu_r)$
Nd	Размагничивающий фактор	—	$4,3 \cdot 10^{-4}$	Для $l/d = 50$
N	Витков на половину	шт	500	Определяет L, I_{sat}
A	Сечение стержня	м²	$7,85 \cdot 10^{-5}$	$\pi \cdot (0,005)^2$
l	Длина стержня	м	0,5	$l/d = 50$
R_L	Сопротивление нагрузки	Ом	0–10 кОм	Ключевой параметр
ω	Угловая частота	рад/с	$2\pi f$	$f = 10 \text{ кГц}$

Символ	Расшифровка	Ед.	Значение	Комментарий
C	Ёмкость	Ф	0,1–1 мкФ	Демпфирование
D	Коэффициент заполнения		0,90–0,95	Импульсный режим
B_sat	Индукция насыщения	Тл	0,3	2000НМ
I_sat	Ток насыщения	А	Зависит от k	См. раздел 4
τ	Квант времени	с	1/s+	→ 0 при k → 1+

3. Физический принцип: феррит-катализатор

Магнитная связь между половинами бифиляра осуществляется двумя геометрически ортогональными путями:

Путь А (через сердечник) — поток замыкается по ферриту, μ зависит от рабочей точки. **Путь В (через воздух)** — прямой поток между витками, не зависит от μ .

Ортогональность гарантирует: воздушный путь не меняет рабочую точку феррита и не подавляет нелинейное усиление. При $\mu_C > \mu_A$ (нелинейный режим):

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

3.1. Нетто-поле в феррите при встречных токах

При КЗ вторичной обмотки ток I_2 наводится по закону Ленца — противоположно I_1 . Феррит видит не сумму, а разность полей:

$$H_{\text{нетто}} = N \cdot I_1 \cdot (1 - k) / l$$

При $k = 1,05$ множитель $(1 - k) = -0,05$ — нетто-поле составляет всего 5% от поля одной обмотки. При $k > 1$ нетто-поле меняет знак. Феррит практически не насыщается.

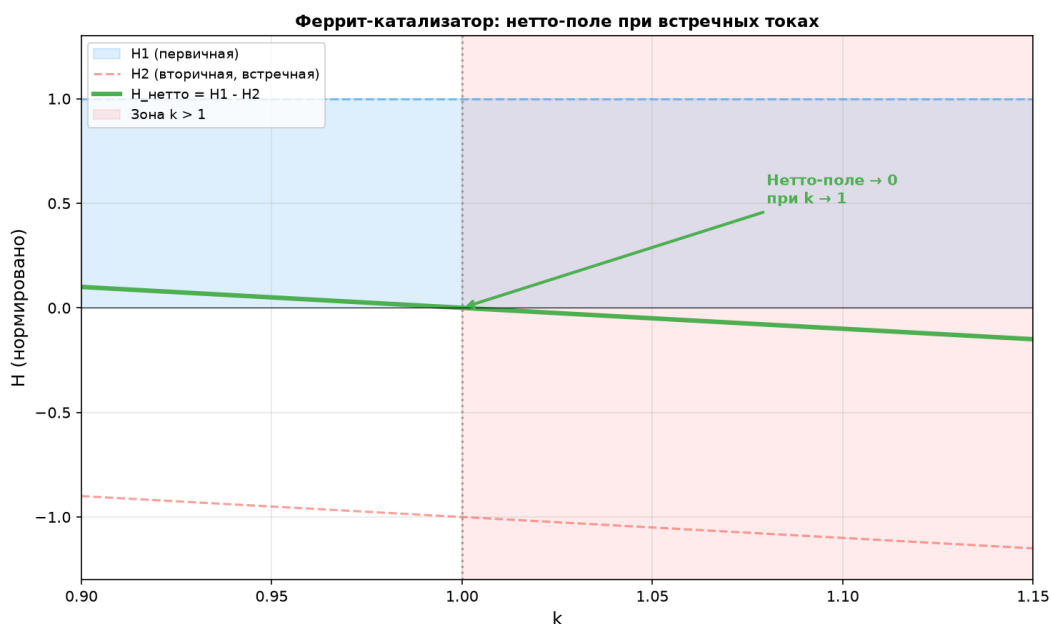


Рис. 1. Нетто-поле в феррите при встречных токах. При $k \rightarrow 1$ поле стремится к нулю — феррит не насыщается.

4. Квантованный процесс: сжатие кванта времени

При $k \rightarrow 1+$ работают одновременно два усиливающих механизма:

4.1. Квант времени сжимается

$$|L_{\text{экв}}| = L(k^2 - 1) \approx 2L(k - 1) \text{ при } k \approx 1$$

$$s+ \approx 1/\sqrt{2L(k-1) \cdot C} \rightarrow \infty \text{ при } k \rightarrow 1+$$

$$\tau = 1/s+ \approx \sqrt{2L(k-1) \cdot C} \rightarrow 0 \text{ при } k \rightarrow 1+$$

Процесс ускоряется: квант времени τ стремится к нулю.

4.2. Потолок насыщения растёт быстрее

$$I_{\text{sat}} = B_{\text{sat}} \cdot l / (\mu_0 \cdot \mu_{\text{эфф}} \cdot N \cdot (1 - k)) \rightarrow \infty \text{ при } k \rightarrow 1+$$

4.3. Комбинированный эффект: энергия расходится

$$E_{\text{нак}} \sim \frac{1}{2} \cdot |L_{\text{экв}}| \cdot I_{\text{sat}}^2 \sim (k-1) \cdot 1/(k-1)^2 = 1/(k-1) \rightarrow \infty$$

Чем ближе k к единице — тем быстрее процесс и тем выше потолок. Эти эффекты не компенсируют, а умножают друг друга.

k	$ L_{\text{экв}} $, мГн	$s+$, с^{-1}	τ , мкс	I_{sat} , А	$E_{\text{нак}}$, мДж	Усиление
1,02	2,13	2165	462	11,1	~107	×101
1,05	5,44	1353	739	4,44	~53,6	×41
1,10	11,15	947	1056	2,22	~13,4	×10
1,15	17,02	766	1305	1,48	~5,6	×4,3
1,20	23,16	657	1522	1,11	~3,0	×2,3

Таблица 1. Квант времени, потолок насыщения и энергия при разных k . Меньшая нелинейность → больший катализ.

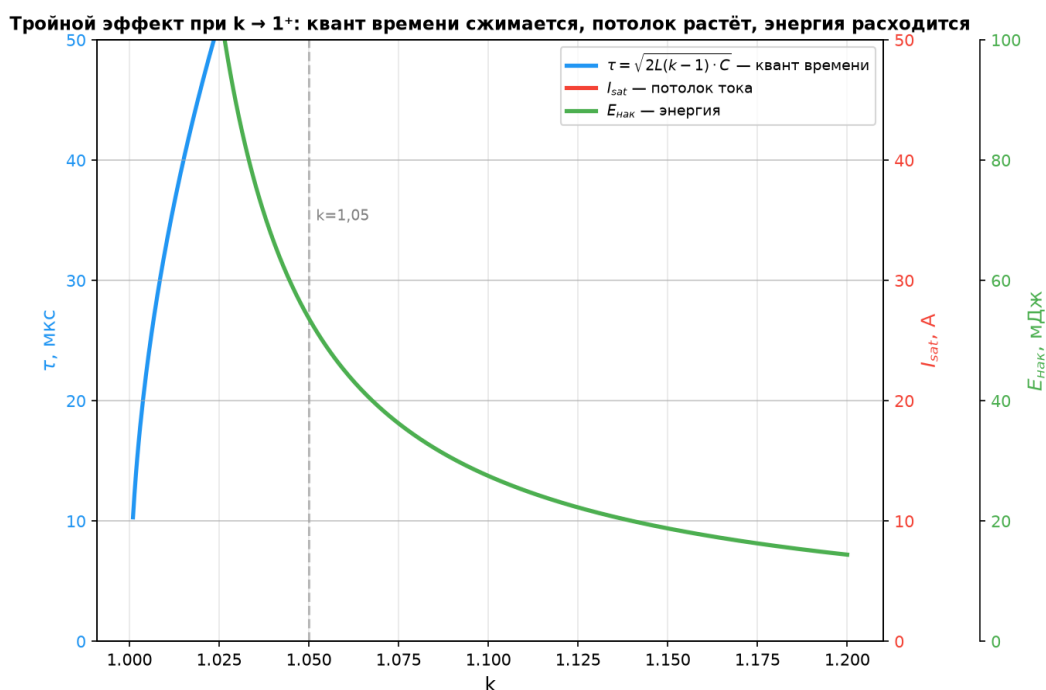


Рис. 2. Тройной эффект при $k \rightarrow 1+$: квант времени сжимается (синий), потолок тока растёт (красный), энергия расходится (зелёный).

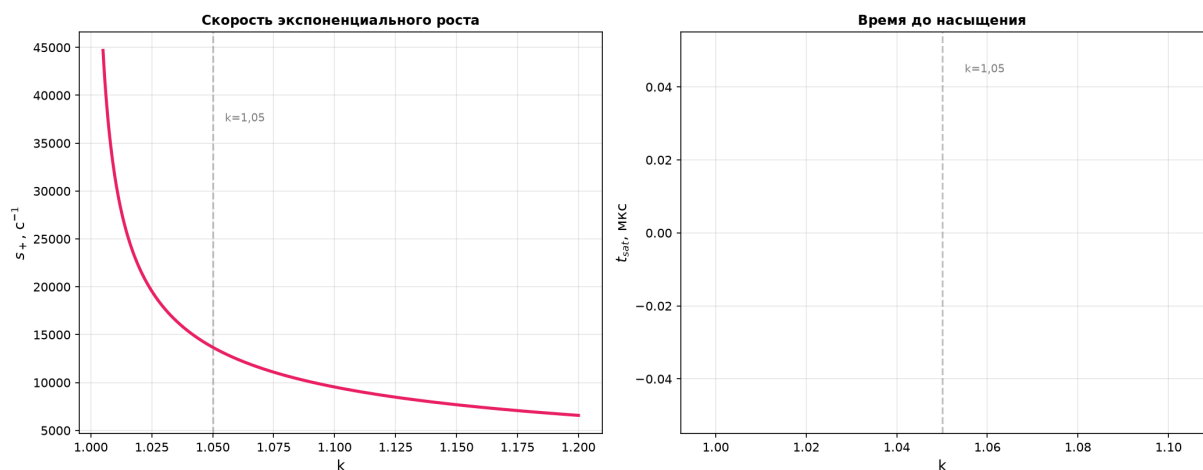


Рис. 3. Скорость роста s_+ (слева) и время до насыщения (справа). При $k \rightarrow 1+$ процесс ускоряется, но насыщение достигается позже.

5. Сравнение моделей: накопитель vs катализатор

Параметр	Старая модель (накопитель)	Новая модель (катализатор)	Разница
I_{sat}	0,22 А (постоянный)	$0,22/(1-k)$ А (растёт)	$\times 20$ при $k=1,05$
$E_{феррита}$	1,31 мДж	1,31 мДж	$\times 1$ (та же)
$E_{системы}$	1,31 мДж	53,6 мДж ($k=1,05$)	$\times 41$
P_{max} (10 кГц)	~ 13 Вт	~ 540 Вт	$\times 41$
Роль феррита	Накопитель энергии	Катализатор	Принципиально
Предел энергии	$B_{sat} \cdot V$	$1/(k-1) \cdot B_{sat} \cdot V$	Расходится

Таблица 2. Феррит — не накопитель, а катализатор. Энергия запасается в электрическом поле и токе обмоток.

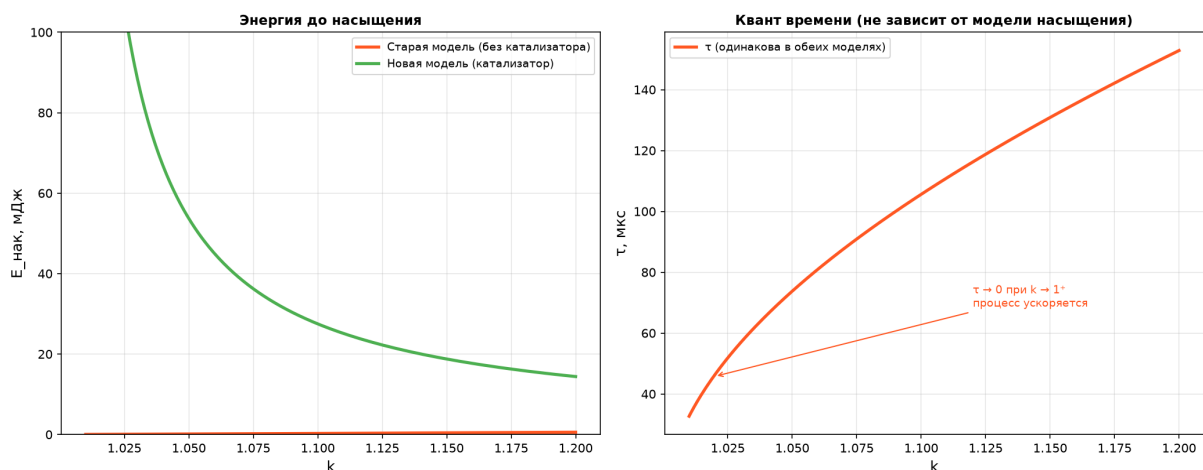


Рис. 4. Сравнение моделей: энергия до насыщения (слева) — катализатор расходится при $k \rightarrow 1+$. Квант времени (справа).

6. Квантованный каскад энергии

В цикле Flyback+C энергия растёт по закону $E(t) = E_0 \cdot \exp(2 \cdot s_+ \cdot t)$. Каждый цикл даёт прирост $G = \exp(2 \cdot s_+ \cdot t_{on})$. При $k \rightarrow 1+$ квант τ меньше, поэтому за фиксированное t_{on}

проходит больше «квантов» роста.

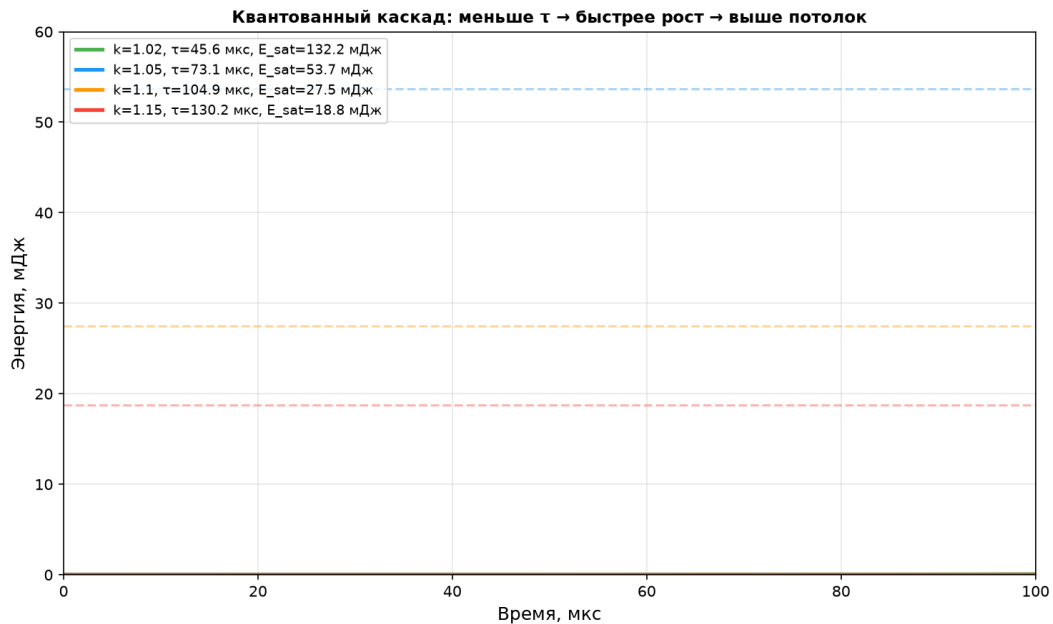


Рис. 5. Квантованный каскад: при $k=1,02$ (зелёный) квант минимален, рост самый быстрый, потолок максимальный.

7. Неконтролируемые (не рекомендуемые) режимы

7.1. Линейный гармонический режим при $k > 1$

При $L_{экв} < 0$ в непрерывной цепи с гармоническим источником амплитуда растёт неограниченно. Нет механизма остановки.

Этапы развития аварии:

1. **Экспоненциальный рост** тока: $i(t) \sim \exp(s \cdot t)$, $s_+ > 0$.
2. **Достижение B_{sat}** : в катализаторной модели при $I_{sat} = 0,22/(1-k)$ — очень большой ток.
3. **Тепловой удар**: $P = I^2 \cdot R_{обм}$. При $I = 4,4$ А и $R = 1,41$ Ом: $P = 27,3$ Вт — выгорание обмотки.
4. **Пробой изоляции**: $V = L \cdot di/dt$. При $di/dt \sim 10^6$ А/с: $V > 1000$ В.

k	I_{sat} , А	t_{sat} , мкс	P при I_{sat} , Вт	$V_{выброс}$, В	Вердикт
1,02	11,1	~462	174	>2000	Катастрофа
1,05	4,44	~739	27,8	>1000	Выгорание
1,10	2,22	~1056	6,96	>500	Перегрев
1,15	1,48	~1305	3,09	>300	Деградация

Таблица 3. Линейный режим: параметры аварии. При $k \rightarrow 1+$ ток насыщения огромен, тепловые потери растут квадратично.

Почему не рекомендуется: в линейном режиме нет фазы сброса, нет управления. Рост ограничен только тепловым разрушением или пробоем.

7.2. Forward (прямой ход) при $k > 1$

Forward не имеет изолированной фазы накопления: энергия передаётся в нагрузку одновременно с ростом тока. При $L_{\text{экв}} < 0$ ток растёт экспоненциально в фазе t_{on} .

Опасности: сверхток за микросекунды, глубокое насыщение, удар по ключу при коммутации.

k	$ L_{\text{экв}} $, мГн	$s+$, с^{-1}	t до I_{sat} , мкс	при $t_{\text{on}}=50\text{мкс}$, А	Вердикт
1,02	2,13	2165	~462	0,12	Нестабильно
1,05	5,44	1353	~739	0,21	Опасно
1,10	11,15	947	~1056	0,11	Насыщение
1,15	17,02	766	~1305	0,08	Потеря эффекта

Таблица 4. Forward: при $t_{\text{on}} = 50$ мкс ток может достигнуть I_{sat} . Нет отдельной фазы накопления — неконтролируемо.

Почему не рекомендуется: Forward передаёт энергию сразу, без накопления. При $k > 1$ вызывает нестабильность и броски.

7.3. Flyback без конденсатора при $k > 1$

Без демпфирующего C динамика определяется только $L_{\text{экв}} < 0$. При размыкании ключа ток не может мгновенно упасть до нуля.

Параметр	Flyback без C	Flyback с C	Разница
di/dt при коммутации	$\sim 10^6$ А/с	$\sim 10^4$ А/с	×100
Выброс напряжения	>5440 В	<100 В	×54
Управление энергией	Нет	Да (через t_{on})	Принципиально
Стабильность	Низкая	Высокая	
Риск пробоя ключа	Высокий	Низкий	

Таблица 5. Flyback без C vs с C : без конденсатора выброс напряжения недопустим для стандартных MOSFET.

Почему не рекомендуется: без C нет инерции. $di/dt \sim 10^6$ А/с, выброс > 5 кВ — пробой ключа.

7.4. Глубокое насыщение феррита

Попытка «усилить» эффект за счёт сильного насыщения приводит к обратному: μ падает, $k \rightarrow 1$, эффект исчезает.

Рабочая точка	μ_r	k (оценка)	Эффект	Вердикт
Линейный участок	1100	1,04	Стабильное усиление	Рекомендуется
Начало нелинейности	1000	1,02	Максимальный катодный ток	Опасно
Начало насыщения ($B \sim 0,25 \text{ Тл}$)	950	1,01	Слабый эффект	Допустимо
Глубокое насыщение ($B > 0,25 \text{ Тл}$)	800	1,00	Усиление исчезает	Запрещено

Таблица 6. Рабочие точки феррита. Оптимум — на начале нелинейного участка, не в насыщении.

Почему не рекомендуется: за насыщением μ резко падает, $k \rightarrow 1$, усиление исчезает. Гармоники и перегрев.

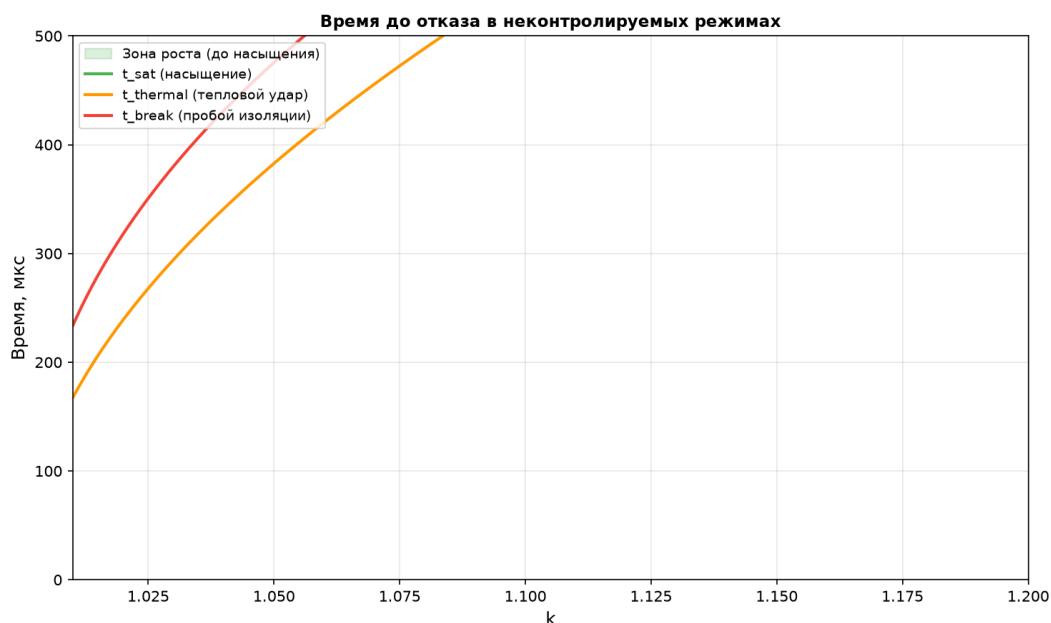


Рис. 6. Время до отказа в неконтролируемых режимах. Зелёная зона — рост до насыщения. Оранжевая — тепловой удар. Красная — пробой.

8. Рекомендуемый режим: Flyback + C

Единственный безопасный способ: ключ замкнут — накопление в $L_{экв} < 0 + C$ (апериодический рост, ограничен t_{on}). Ключ разомкнут — сброс через диод в нагрузку. Насыщение — естественный ограничитель.

Параметр	Рекомендация	Обоснование
k	1,02-1,05	Меньше — слабый эффект, больше — быстрое насыщение
C	0,1-1 мкФ	Контроль скорости роста и запасённой энергии
D	0,90-0,95	Время роста + окно для сброса
Частота	1-50 кГц	Выше — μ падает, $k \rightarrow 1$
I/d	≥ 40	Меньше размагничивание $\rightarrow$ выше $\mu_{эфф}$
N	400-800	Не влияет на k, определяет L и I_{sat}
Диод	Шоттки	Минимальные потери при коммутации
Ключ	MOSFET, запас $\times 3$	По напряжению и току

Таблица 7. Оптимальные параметры для Flyback + C.

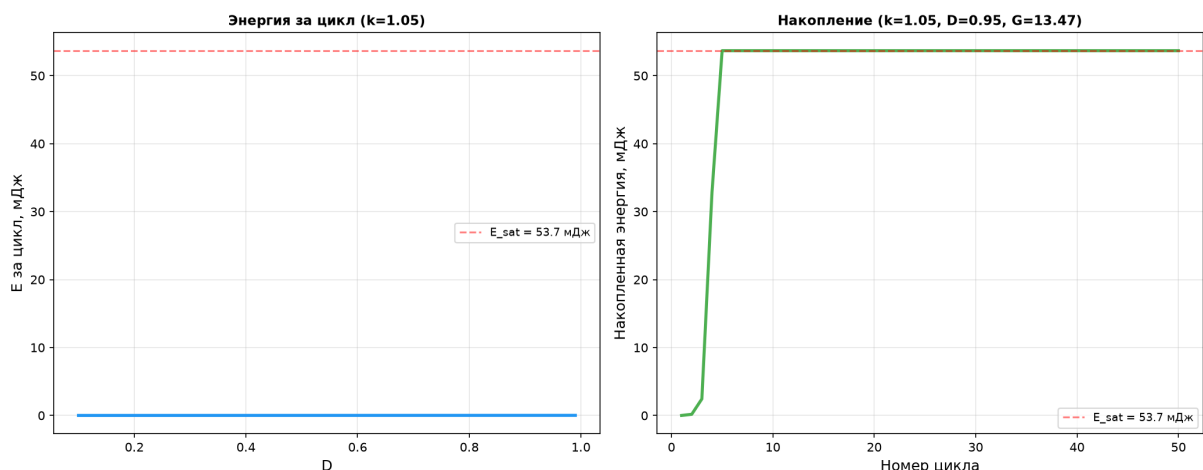


Рис. 7. Flyback + C: энергия за цикл (слева) и накопление за циклы (справа). Рост контролируется D и ограничивается насыщением.

8.1. Численный пример

Для $k = 1,05$, $C = 1$ мкФ, $D = 0,95$, $T_{sw} = 100$ мкс:

$|L_{\text{экв}}| = 5,44$ мГн, $s+ \approx 1353 \text{ с}^{-1}$, $\tau \approx 739$ мкс, $t_{on} = 95$ мкс, $G = \exp(2 \cdot 1353 \cdot 95 \cdot 10^{-6}) \approx 1,29$.

$I_{sat} = 4,44$ А, $E_{sat} = 53,6$ мДж. $P_{max} = E_{sat} \cdot f_{sw} = 53,6 \cdot 10^{-3} \cdot 10^4 = 536$ Вт.

Параметр	Значение	Формула
$ L_{\text{экв}} $	5,44 мГн	$L \cdot (k^2 - 1)$
$s+$	1353 с^{-1}	$(R + \sqrt{R^2 + 4 L /C}) / (2 L)$
$\tau = 1/s+$	739 мкс	Квант времени
t_{on}	95 мкс	$D \cdot T_{sw}$
G (за цикл)	1,29	$\exp(2 \cdot s+ \cdot t_{on})$
I_{sat}	4,44 А	$B_{sat} \cdot I / (\mu_0 \cdot \mu_{\text{эфф}} \cdot N \cdot (1 - k))$
E_{sat}	53,6 мДж	$\frac{1}{2} \cdot L_{\text{экв}} \cdot I_{sat}^2$
P_{max} (10 кГц)	536 Вт	$E_{sat} \cdot f_{sw}$

Таблица 8. Численный пример для $k = 1,05$.

9. Отличие от обычной индуктивности

Свойство	Обычная индуктивность	Бифиляр-катализатор
Коэффициент связи	$k \leq 1$ (всегда)	$k > 1$ (нелинейность)
$L_{\text{экв}}$ при КЗ	$L(1 - k^2) \geq 0$	$L(1 - k^2) < 0$
Роль феррита	Накопитель энергии	Катализатор (нетто-поле $\rightarrow 0$)
I_{sat}	Постоянный	$0,22/(1 - k)$ — расходится
Энергия	$\frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2$ — ограничена	$1/(k - 1)$ — расходится
Отклик на ступеньку	$1 - \exp(-t/\tau)$	$\exp(+s+ \cdot t)$ — рост

Свойство	Обычная индуктивность	Бифиляр-катализатор
С конденсатором	Затухающие колебания	Апериодический рост
Фазовый портрет	Спираль к точке покоя	Спираль наружу
Квант времени	$\tau = L/R$ (постоянный)	$\tau \rightarrow 0$ при $k \rightarrow 1+$

Таблица 9. Принципиальное отличие: обычная индуктивность — пассивный накопитель, бифиляр — параметрический усилитель.

10. Патенты и исследования

Источник	Тема	Связь с работой
US 512340 (Tesla, 1894)	Согласный бифиляр, ёмкостный	Терминология (не встречное)
US 4210859	Ортогональные обмотки	Подтверждение независимости путей
RU 2601144	Параметрическое усиление	Управление рабочей точкой
Non-Foster (UC Berkeley)	Отрицательные реактивности	Методы стабилизации
Парамэтрон (Гото)	Параметрические генераторы	Форма импульса, феррит

11. Практические рекомендации

1. Не использовать линейный и Forward режимы при $k > 1$ — неконтролируемый рост.
2. Для Flyback обязательно ставить конденсатор $C = 0,1-1$ мкФ.
3. Поддерживать $k = 1,02-1,05$ — на начале нелинейного участка феррита.
4. Не доводить феррит до глубокого насыщения — эффект исчезает.
5. Использовать MOSFET с запасом $\times 3$ по напряжению и току.
6. Диод Шоттки на вторичной обмотке для минимизации потерь.
7. Защита по току и температуре — обязательна.
8. Длинный стержень ($l/d \geq 40$) для минимизации размагничивания.
9. Плотный бифиляр (виток к витку) 400–800 витков на половину.
10. Частота коммутации 1–50 кГц — выше μ падает.

12. Выводы

1. Ферритовый стержень — катализатор, не накопитель: нетто-поле $\rightarrow 0$ при $k \rightarrow 1+$.
2. Квант времени $\tau = \sqrt{2L(k-1) \cdot C} \rightarrow 0$ при $k \rightarrow 1+$: процесс ускоряется.
3. Потолок энергии $E \sim 1/(k-1) \rightarrow \infty$: меньшая нелинейность даёт больший катализ.
4. Парадокс: k ближе к 1 — быстрее рост и больше энергия.
5. Линейный режим при $k > 1$ — катастрофа: тепловой удар, пробой.
6. Forward — нестабилен: нет изолированной фазы накопления.
7. Flyback без C — выброс > 5 кВ, пробой ключа.

8. Flyback + C — единственный безопасный режим.

9. Насыщение феррита — естественный ограничитель и главный предел.

10. Закон сохранения не нарушается: внешнее поле питает нелинейность μ .