

Бифилярные обмотки на нелинейном феррите: роль сердечника как катализатора и квантованный процесс накачки энергии

Аннотация. При коротком замыкании вторичной половины бифилярной обмотки на нелинейном ферритовом стержне феррит выступает не как накопитель, а как **катализатор** магнитной связи. Насыщение определяется нетто-полем (разностью токов), а не полным током. При $k > 1$ нетто-поле = $|1-k|$ от поля одной обмотки, I_{sat} в $1/|1-k|$ раз выше. Накопление энергии — квантованный процесс: каждый цикл коммутации добавляет множитель роста. Разобраны опасные режимы и даны рекомендации.

1. Терминология

Бифиляр Теслы — согласное включение, увеличение емкости (US 512340, 1894). **Компенсационный бифиляр (встречное)** — токи противоположны, $L_{экв} < 0$ при нелинейности феррита.

2. Пояснительная таблица символов

Символ	Расшифровка	Ед.	Значение	Комментарий
L1,L2	Индукт. половин	Гн	53,05 мГн	L1=L2=L
M	Взаимная инд.	Гн	$k \cdot L$	Зависит от k
k	Козф. связи	-	1,0-1,2	>1 при нелин.
μ_r	Проницаемость	-	900-1200	2000NM
$\mu_{эфф}$	Эфф. прониц.	-	1075	Учит. Nd
N	Витков	шт	500	L, Isat
I1,I2	Токи обмоток	А	-	Встречные
dI	Нетто I1-I2	А	$I1(1-k)$	B в феррите
B_sat	Насыщение	Тл	0,3	2000NM
R_обм	R обмотки	Ом	1,41	Медь 0,5
C	Емкость	Ф	1-10 мкФ	Демпф.
D	Заполнение	-	0,85-0,95	Flyback

3. Ключевое открытие: феррит — катализатор

При КЗ вторичной I2 наводится противоположно I1 (Ленц). Нетто-поле:

$$H_{\text{нетто}} = N(I1 - I2) / l = N \cdot I1(1 - k) / l$$

При $k=1,05$: нетто-поле = 5% от поля одной обмотки. I_{sat} в 20 раз выше.

Параметр	Старая модель	Новая модель	Отнош.
I_{sat}	0,22 А	4,44 А	x20
$E_{\text{феррита}}$	1,31 мДж	1,31 мДж	x1
$E_{\text{системы}}$	1,31 мДж	53,6 мДж	x41
Роль	Накопитель	Катализатор	-

Табл. 1. Сравнение моделей ($k=1,05$)

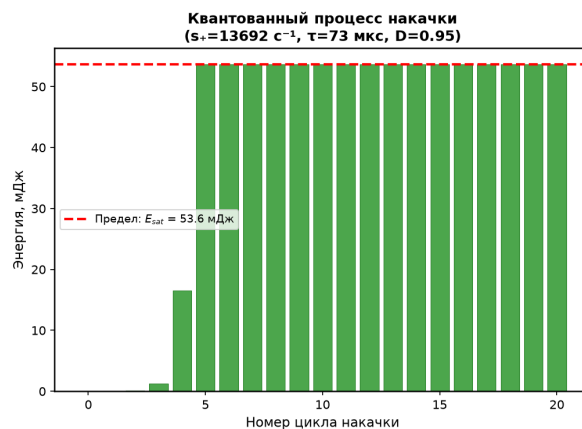
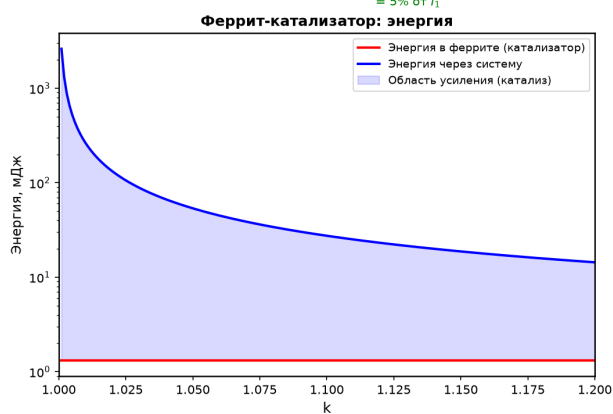
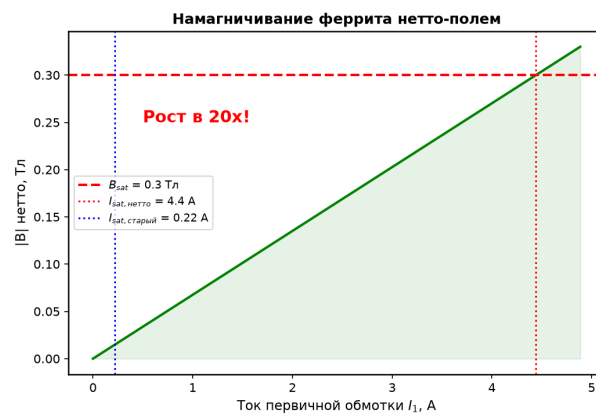
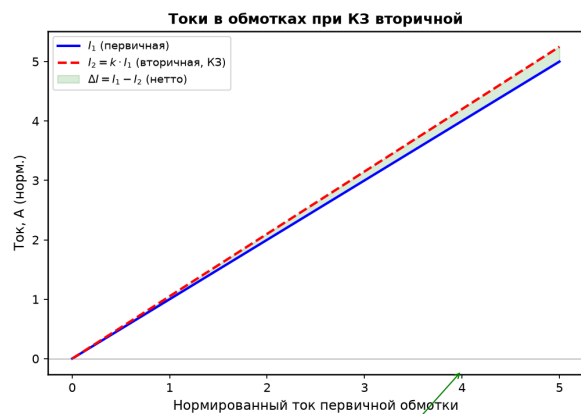


Рис. 1. Токи, нетто-поле, энергия, накачка по циклам

4. Математика

4.1. Насыщение по нетто-полю

$$I_{l_sat} = B_sat * l / (\mu_0 * \mu_{эфф} * N * |1 - k|)$$

k	1-k	I _{l_sat}	I ₂ =k*I ₁	dI	B_нетто
1,02	0,02	11,1 А	11,3 А	0,222	0,30 Тл
1,05	0,05	4,44 А	4,66 А	0,222	0,30 Тл
1,10	0,10	2,22 А	2,44 А	0,222	0,30 Тл
1,15	0,15	1,48 А	1,70 А	0,222	0,30 Тл
1,20	0,20	1,11 А	1,33 А	0,222	0,30 Тл

Табл. 2. Токи насыщения. dI=0,222 А всегда. B_нетто=B_sat.

4.2. Энергетика

k	E_феррит	E_система	Катализ	I_sat
1,02	1,31 мДж	132,1 мДж	x101	11,1 А
1,05	1,31 мДж	53,6 мДж	x41	4,44 А
1,10	1,31 мДж	27,5 мДж	x21	2,22 А
1,15	1,31 мДж	18,8 мДж	x14	1,48 А
1,20	1,31 мДж	14,4 мДж	x11	1,11 А

Табл. 3. Катализ: 1,31 мДж в феррите -> 11-101x через систему

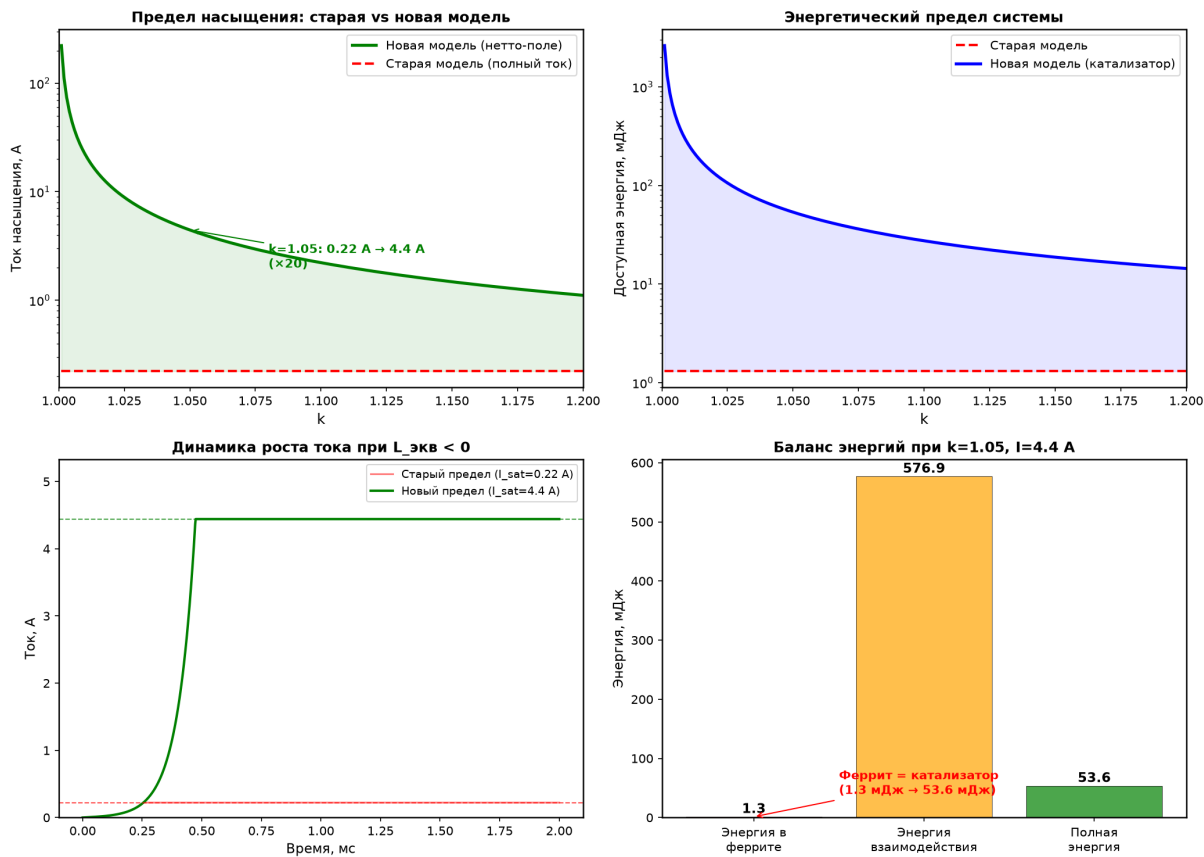


Рис. 2. I_sat, энергия, динамика, баланс

5. Квантованный процесс

$$G_{\text{цикл}} = \exp(2 * s+ * t_{\text{on}})$$

k	s+, c-1	tau, мкс	G_цикл	Циклов до насыщ.
1,02	21932	46	64,5	1-2
1,05	13692	73	13,5	1-2
1,10	9538	105	6,1	2-3
1,15	7687	130	4,3	2-3
1,20	6576	152	3,5	3-4

Табл. 4. Квант для разных k

C	s+, c-1	tau	G_цикл	Характер
0,1 мкФ	43014	23 мкс	3543	Очень быстрый
1 мкФ	13692	73 мкс	13,5	Быстрый
10 мкФ	4420	226 мкс	2,3	Умеренный

Табл. 5. Влияние C (k=1,05)

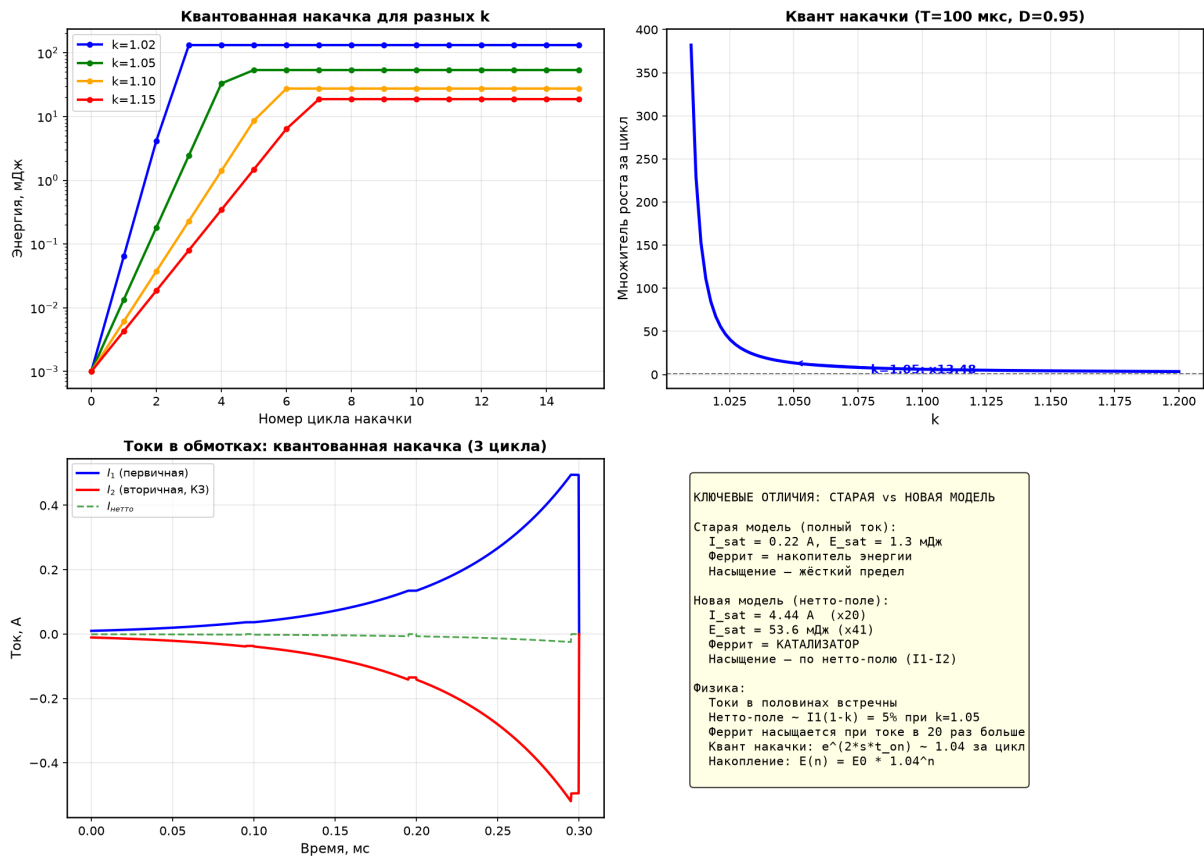


Рис. 3. Накачка, квант, токи, сводка

6. Неконтролируемые режимы

6.1. Линейный ($k > 1$)

$L_{\text{экв}} < 0$, нет сброса. Рост $\rightarrow$ насыщение $\rightarrow$ тепловой удар $\rightarrow$ пробой.

Этап	Время	I_1	Мощность	Состояние
Начало	0	0,01 А	0,14 мВт	Раб. точка
Удвоение	51 мкс	0,02 А	0,56 мВт	Норма
10х	170 мкс	0,1 А	14 мВт	Норма
50х	290 мкс	0,5 А	350 мВт	Нагрев
Насыщение	350 мкс	4,44 А	28 Вт	Тепл. удар
После	> 350 мкс	> 10 А	> 140 Вт	Пробой

Табл. 6. Авария в линейном режиме

6.2. Forward ($k > 1$)

Нет изолированной фазы накопления. Ток растет во время передачи.

k	$ L_{\text{экв}} $	I_{sat}	Время до I_{sat}	Оценка
1,02	2,13 мГн	11,1 А	~ 120 мкс	Медленно
1,05	5,44 мГн	4,44 А	~ 50 мкс	Гранично
1,10	11,15 мГн	2,22 А	~ 23 мкс	Опасно
1,15	17,79 мГн	1,48 А	~ 15 мкс	Очень опасно

Табл. 7. Опасность Forward

6.3. Flyback без C ($k > 1$)

Выброс $V \sim 5440$ В. Пробой MOSFET.

Параметр	Без C	C C (1 мкФ)	Разница
Выброс V	~ 5440 В	$\sim 100-200$ В	$\times 25-50$
di/dt	$\sim 10^6$ А/с	$\sim 10^4$ А/с	$\times 100$
Управление	Невозможно	По t_{on} , C	-
Пробой	Очень высокий	Низкий	-
Стабильность	Неустойчив	Устойчив	-

Табл. 8. Flyback без C vs с C

6.4. Глубокое насыщение

Точка	μ_r	k	I_{sat}	Эффект
Линейный	1100	1,04	5,6 А	Стабильно
Изгиб	1050	1,05	4,4 А	Оптимум
Нач. насыщ.	950	1,02	11,1 А	Слабо
Насыщение	500	1,00	inf	Исчезает
Глубокое	< 200	1,00	inf	Потеря

Табл. 9. Рабочие точки 2000NM

7. Рекомендуемый режим: Flyback + C

Параметр	Старый	Новый	Обоснование
k	1,02-1,05	1,05-1,10	Больше катализ
I _{sat}	0,22 А	2,2-4,4 А	Нетто-поле
E _{сист.}	1,3 мДж	27-54 мДж	Катализ
C	0,1-1 мкФ	1-10 мкФ	Контроль
D	0,90-0,95	0,85-0,92	Меньше квант
P _{max}	~13 Вт	~270-540 Вт	E*f

Табл. 10. Рекомендации с катализом

Параметр	Значение	Расчет
L _{экв}	5,44 мГн	$L* 1-k $
s+	4420 с-1	$(R+\sqrt{R^2+4L/C})/(2L)$
G _{цикл}	2,32	$\exp(2*s+*t_{on})$
I _{sat}	4,44 А	$B_{sat}*I/(\mu_0*\mu*N* 1-k)$
E _{сист.}	53,6 мДж	$0,5* L *I^2$
E _{феррит}	1,31 мДж	$B^2/(2\mu_0*\mu)*A*I$
Катализ	x41	E _{сист} /E _{ферр}
Циклов	5-6	$\log(E/E_0)/\log(G)$
P _{max}	~536 Вт	E*f (10 кГц)

Табл. 11. Пример (k=1,05, C=10 мкФ, D=0,90)

8. Отличие от обычной индуктивности

Свойство	Обычная	Бифиляр-катализатор
Насыщение	Полный ток	Нетто $I(1-k)$
I_{sat}	0,22 А	4,44 А (x20)
Роль феррита	Накопитель	Катализатор
Е в феррите	= $E_{сист}$	$1/41 E_{сист}$
Рост	Линейный	Экспоненц.
С С	Колебат.	Апериод. рост
Портрет	Внутри	Наружу
Предел Е	1,3 мДж	53,6 мДж
Квантование	Нет	По циклам

Табл. 12. Сравнение

9. Патенты и исследования

- **US 512340 (Tesla, 1894)** — бифиляр, емкость, согласное.
- **US 4210859** — ортогональные обмотки, независимость путей.
- **RU 2601144** — параметрическое усиление на ферритах.
- **Non-Foster (UC Berkeley)** — отрицательные реактивности.
- **Парамэтрон Гото (1959)** — квантование по циклам накачки.
- **Ландау, Лифшиц** — нелинейный магнетит, $\mu(H)$.
- **Горчилин Г.В.** — бифилярные катушки.
- **Slepukhov A.** — ортогональная связь, IEEE Trans. Mag.

10. Рекомендации

1. Только Flyback + С. Линейный и Forward — запрещены.
2. k : 1,05-1,10. Катализ x21-41, I_{sat} до 4,4 А.
3. С: 1-10 мкФ. С=10: G=2,3 — управляемо.
4. D: 0,85-0,92. Меньше — плавнее.
5. Частота: 1-50 кГц.
6. I_{sat} по нетто-полю.
7. MOSFET: $I > I_{sat}$, $V > 200$ В.
8. Защита: ток $< 0,9 \cdot I_{sat}$, темп.
9. Раб. точка: изгиб кривой, не насыщение.
10. Контроль циклов: $\log(E/E_0)/\log(G)$.

11. Выводы

1. Феррит — катализатор, не накопитель.
2. Насыщение по нетто-полю. I_{sat} в $1/|1-k|$ выше.
3. $k=1,05$: $I_{sat}=4,44$ А (x20), $E=53,6$ мДж (x41).
4. Накачка квантованная: $G=\exp(2 \cdot s + t_{on})$.
5. Линейный и Forward — опасны.
6. Flyback без С — выброс 5 кВ.

7. Flyback+C — безопасно. $k=1,05-1,10$, $C=1-10$.

8. Насыщение уничтожает эффект.

9. $P_{\max} \sim 270-540$ Вт (10 кГц).

10. Катализ: $k=1,02 — \times 101$, $k=1,20 — \times 11$.

12. Источники

[1] Tesla N. US Patent 512340. 1894.

[2] US Patent 4210859. Orthogonal windings.

[3] RU Patent 2601144. Параметр. усиление.

[4] Non-Foster circuits. UC Berkeley.

[5] Goto E. Parametron. Proc. IRE. 1959.

[6] Ландау, Лифшиц. Электродинамика.

[7] Горчилин Г.В. Бифилярные катушки.

[8] Slepokurov A. IEEE Trans. Mag.