

# Измерение параметров индукторов установок индукционного нагрева

## на режимах, близких к номинальным

**Высокочастотные источники питания для индукционного нагрева металлов занимают особое место среди устройств силовой электроники. В настоящее время известно достаточно большое количество силовых тиристорных и транзисторных схем, реализующихся в источниках питания для индукционного нагрева. Вне зависимости от типа применяемой схемы, процесс согласования индуктора с источником питания в ряде случаев представляет собой достаточно сложную задачу, для облегчения решения которой необходимо знание параметров индуктора. Одному из способов экспериментального определения этих параметров посвящена эта статья.**

**Юрий Болотовский**

eltech@ufacom.ru

**Леонид Гутин**

npp.kurai@mail.ru

**Георгий Таназлы**

g\_thanazly@mail.ru

**Александр Шуляк**

npp.kurai@mail.ru

Индуктор представляет собой систему из проводов, создающих высокочастотное электромагнитное поле, и нагреваемого проводящего материала. Следует отметить нелинейность этой системы, определяемую различным поведением нагреваемого материала в полях с различными напряженностями и частотами. Этим определяется нежелательность измерения параметров системы «индуктор — проводящий материал» при напряжениях и токах, протекающих в индукторе и существенно отличающихся от тех, которые характеризуют систему в номинальном режиме работы.

Известны способы и устройства для измерения добротности  $Q$  индукторов [1, 2]. В данных устройствах измерение  $Q$  производится на малых токах, что в ряде случаев может привести к погрешностям, необходимости пересчета полученных параметров или увеличению объема экспериментальных работ при согласовании источника питания с индукторами.

Рассмотрим разряд конденсатора  $C$  на упрощенную эквивалентную последовательную схему замещения индуктора, состоящую из активного сопро-

тивления  $R$  и индуктивности  $L$  (рис. 1). Коммутация в схеме производится идеальным ключом  $K$ .

Будем считать, что сопротивление  $R$  состоит из трех сопротивлений

$$R = R_1 + R_2 + R_3 \quad (1)$$

где  $R_1$  — сопротивление индуктора, учитывающее потери в меди;  $R_2$  — приведенное суммарное сопротивление нагреваемого тела;  $R_3$  — сопротивление ключа, вносимое в контур.

Определим также сопротивление индуктора:

$$R_{\text{инд}} = R_1 + R_2$$

Общеизвестно, что ток в цепи, приведенной на рис. 1, описывается следующим выражением:

$$i = \frac{U_0}{\omega' L} e^{-\delta t} \sin \omega' t, \quad (2)$$

где  $U_0$  — напряжение, до которого заряжен конденсатор в момент замыкания ключа;

$$\delta = \frac{R}{2L};$$

$$\omega' = \sqrt{\frac{1}{LC} - \delta^2}.$$

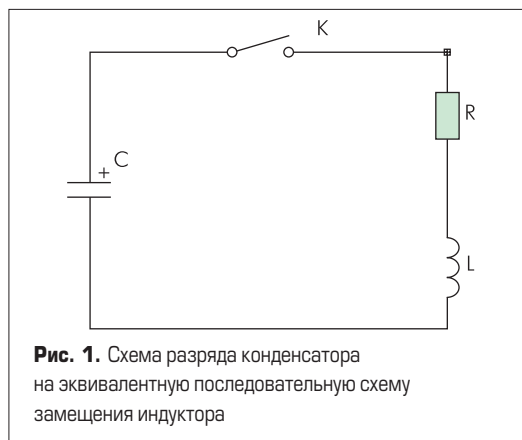
Мгновенное значение кривой тока (2) приведено на рис. 2.

Определим декремент затухания

$$\Delta_i = \frac{I_i}{I_{i+2}} = e^{\delta T_i} \quad (3)$$

Из (3), логарифмируя и преобразуя, получим:

$$\delta = \frac{R}{2L} = \frac{1}{T_i} \ln \Delta_i \quad (4)$$



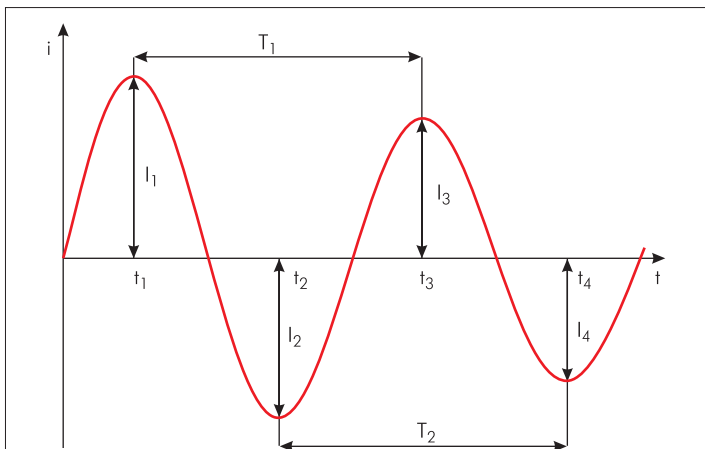


Рис. 2. Мгновенное значение кривой тока в схеме для измерения параметров индуктора

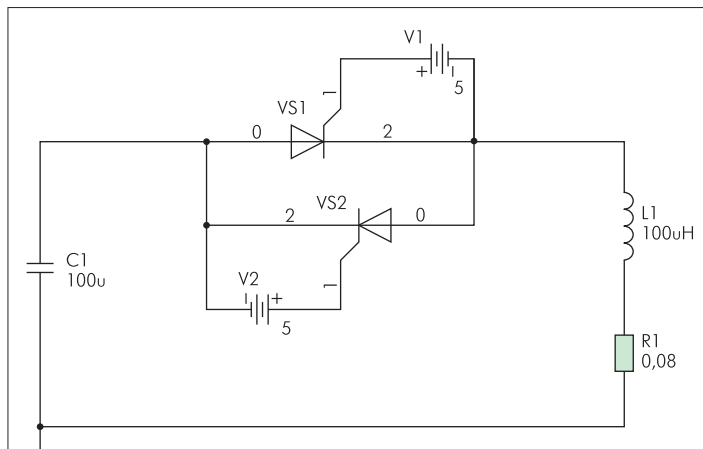


Рис. 4. Схема модели, иллюстрирующая определение параметров индуктора

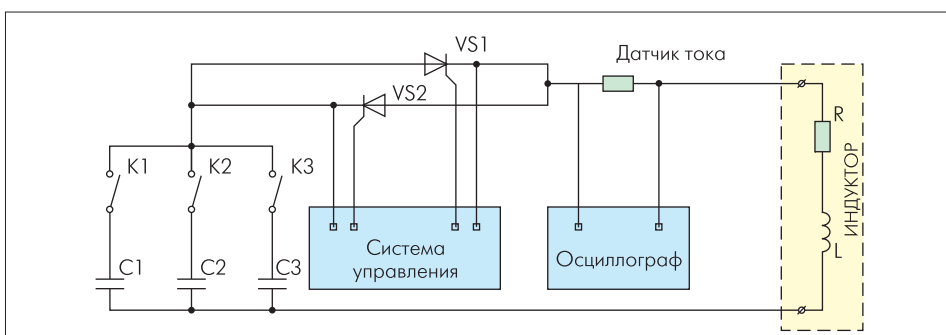


Рис. 3. Упрощенный вариант принципиальной схемы экспериментальной установки

Далее:

$$\omega'_i = \frac{2\pi}{T_i} = \sqrt{\frac{1}{LC} - (\ln \Delta_i)^2} \frac{1}{T_i^2}$$

Отсюда:

$$\frac{4\pi^2}{T_i^2} = \frac{1}{LC} - \left(\frac{\ln \Delta_i}{T_i}\right)^2 \quad (5)$$

Из (5) получим:

$$\frac{1}{LC} = \frac{1}{T_i^2} (4\pi^2 + \ln^2 \Delta_i) \quad (6)$$

Считая C известным, из (6) получим  $L_i$ :

$$L_i = \frac{T_i^2}{C(4\pi^2 + \ln^2 \Delta_i)} \quad (7)$$

Из (7) и (4) получим  $R_i$ :

$$R_i = \frac{2T_i \ln \Delta_i}{C(4\pi^2 + \ln^2 \Delta_i)} \quad (8)$$

Таким образом, для схемы, приведенной на рис. 1, по осциллограмме (рис. 2) определяется значение  $T_i$  и соответствующий этому значению декремент затухания  $\Delta_i$ , а затем по формулам (7) и (8) вычисляются значения  $L_i$  и  $R_i$ . Если имеется возможность вычисления по осциллограмме нескольких значений  $T_i$  и  $\Delta_i$ , то для каждой из этих пар вычисляются  $L_i$ ,  $R_i$ ,

после чего  $L$  и  $R$  вычисляются как среднее значение соответствующих  $L_i$  и  $R_i$ .  
 На рис. 3 приведен упрощенный вариант принципиальной схемы экспериментальной установки (не показана система заряда емкости C).  
 В данной схеме ключ К (рис. 1) заменен встречно-параллельно включенными тиристорами VS1, VS2, отпирающие сигналы на которые подаются от системы управления. Емкость C заменена емкостями C1, C2, C3 (количество емкостей показано условно), которые подключаются к схеме через ключи K1, K2, K3, позволяющие вручную менять величину разрядной емкости. Токковый сигнал снимается с помо-

щью датчика тока, в качестве которого может быть использован низкоомный безындуктивный шунт или трансформатор тока, выполненный на ферритовом кольце. Кривая тока фиксируется с помощью осциллографа с памятью. Лучше всего использовать осциллограф, позволяющий осуществлять цифровую обработку зафиксированной кривой.

Проиллюстрируем процесс измерения параметров индуктора на модели, построенной в среде OrCAD 9.2 (рис. 4).

Здесь применены тиристоры TB143-630-14, описываемые следующей моделью [3]:

```
.subckt TB143-630-14      anode gate cathode
* «Typical» parameters
X1 anode gate cathode Scr params:
+Vdrm=1500v Vrrm=1500v Ih=500ma Vtm=2.0v Itm=1980
+dvdvt=1e9 Igt=320ma Vgt=2.5v Ton=3.2u Toff=32us
+Idrm=70ma
* 01-6-4 Kurai
.ends
```

Управление тиристорами осуществляется с помощью источников постоянного напряжения VDC, емкость C1 заряжена до напряжения 310 В (начальные условия). Параметры элементов приведены на рис. 4.

Результаты моделирования приведены на рис. 5.

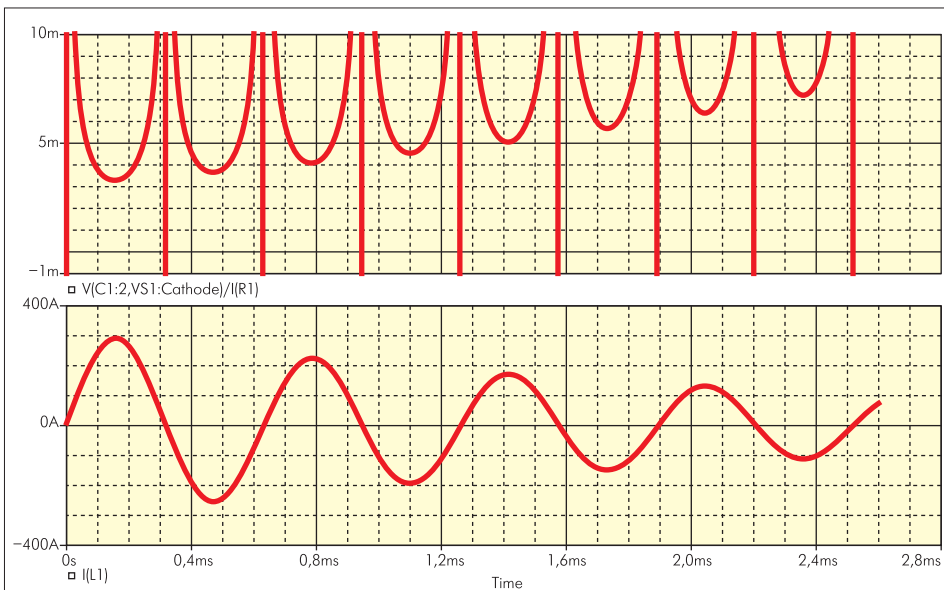


Рис. 5. Осциллограммы сопротивлений тиристоров и тока через индуктор, полученные на модели

Таблица 1. Вычисление значений параметров индуктора по данным, полученным с модели

i	I	t	T	Δ	R <sub>T</sub>	L	R	R <sub>ТС</sub>	R <sub>инд</sub>
1	290.742	0.1562	0.6301	1.3035	0.003291	100.491	0.0845	0.00367545	0.08082455
2	254.753	0.4714	0.6309	1.3058	0.0036498	100.744	0.0852	0.00408985	0.08111015
3	223.045	0.7864	0.6273	1.308	0.0040599	99.595	0.0852	0.0045637	0.0806363
4	195.087	1.1023	0.6283	1.3105	0.0045299	99.91	0.0859	0.00510785	0.08079215
5	170.523	1.4138	0.6274	1.3155	0.0050675	99.619	0.087	0.005735	0.081265
6	148.859	1.7306	0.6274	1.3178	0.0056858	99.617	0.0876	0.0064484	0.0811516
7	129.621	2.0406			0.0064025				
8	112.955	2.358			0.007211				

Таблица 2. Вычисление значений параметров индуктора по данным, полученным с модели с внесением случайных погрешностей при предельно допустимом отклонении 10%

i	I	t	T	Δ	R <sub>T</sub>	L	R	R <sub>ТС</sub>	R <sub>инд</sub>
1	301	0.157	0.613	1.297	0.003291	95.1	0.080703149	0.00367545	0.077027699
2	261	0.518	0.682	1.325	0.00365	117.7	0.097133091	0.00408985	0.093043241
3	232	0.77	0.672	1.326	0.00406	114.3	0.095964403	0.0045637	0.091400703
4	197	1.2	0.531	1.255	0.00453	71.4	0.061083321	0.00510785	0.055975471
5	175	1.442	0.701	1.346	0.005068	124.3	0.105393695	0.005735	0.099658695
6	157	1.731	0.533	1.308	0.005686	71.9	0.072441569	0.0064484	0.065993169
7	130	2.143			0.006403				
8	120	2.264			0.007211				

На нижней осциллограмме приведена кривая тока через индуктор, а на верхней — сопротивление тиристоров VS1, VS2, полученное как частное от деления напряжения на тиристорах V(C1:2, VS1:Cathode) на ток I(R1). Обозначим его R<sub>T</sub>.

В соответствии с обозначениями, приведенными на рис. 2, и по осциллограммам, приведенным на рис. 5, заполним таблицу 1.

В таблице 1 в столбце I приведены i-е значения амплитуд токов (см. рис. 2), в столбце t — время в микросекундах t<sub>i</sub>, соответствующее i-му значению амплитуды тока, в столбце T — разница между t<sub>i+2</sub> и t<sub>i</sub>, в столбце Δ — отношение I<sub>i</sub> к I<sub>i+2</sub>, в столбце R<sub>T</sub> — сопротивление тиристора в момент времени, соответствующий I<sub>i</sub>, в столбце L — значение индуктивности индуктора L<sub>i</sub>, вычисленное по формуле (7), в столбце R — суммарное сопротивление R<sub>i</sub>, вычисленное по формуле (8), в столбце R<sub>ТС</sub> — среднее значение i-го и i+2-го сопротивлений тиристора, в столбце R<sub>инд</sub> — сопротивление индуктора, равное разности между R<sub>i</sub> и R<sub>ТСi</sub>.

По табличным данным, средние значения вычисленных индуктивности и сопротивления составляют L = 99,996 мкГн, R<sub>инд</sub> = 0,08096 Ом. Очевидно, что приведенный пример является нереальным, поскольку такая точность измерения на экспериментальной установке невозможна. Пример приведен для иллюстрации достоверности алгоритма вычисления.

Примем, что точность снятия информации с осциллографа — 10%. По таблице 1 с учетом случайного разброса параметров I<sub>i</sub> и t<sub>i</sub>, исхо-

дя из предельно допустимого отклонения в 10%, построена таблица 2.

Средние значения полученных по таблице 2 значений индуктивности и сопротивления индуктора составляют L = 99,11 мкГн и R<sub>инд</sub> = 0,0801 Ом.

Для получения значений сопротивления R<sub>1</sub>, учитывающего потери в меди, необходимо провести вышеописанный эксперимент для индуктора, из которого удалено нагреваемое тело.

Некоторые соображения по зависимости изменения L, R<sub>1</sub> и R<sub>2</sub> от частоты и материала нагреваемого тела приведены в известной книге [1].

Для измерения параметров индуктора для каждого типа тиристора, применяемого в качестве ключевого элемента (см. схему на рис. 3), с помощью моделирования в среде OrCAD следует получить значения сопротивлений R<sub>Ti</sub> в зависимости от токов I<sub>i</sub>.

В таблице 3 такие значения приведены для тиристора ТБ143-630-14. В случае необходимости получения значений тока между приведенными значениями I<sub>i</sub> используется линейная интерполяция.

Таким образом, методика экспериментального определения параметров индуктора сводится к следующему:

1. Необходимо изготовить экспериментальную установку в соответствии со схемой, приведенной на рис. 3. Количество подключаемых емкостей определяется диапазоном требуемых частот и измеряемыми параметрами индуктора. Для более точного подбора величины емкости рекомендуется использовать следующий ряд емкостей: 1; 2; 4; 8; 16; 32; 64... мкФ. Применение такого ряда позволяет получать любую величину емко-

Таблица 3. Зависимость сопротивлений тиристора от амплитудных значений тока через индуктор

I (A)	R <sub>T</sub> (мОм)	I (A)	R <sub>T</sub> (мОм)	I (A)	R <sub>T</sub> (мОм)
110	7.39	180	4.84	250	3.69
120	6.82	190	4.63	260	3.59
130	6.42	200	4.44	270	3.49
140	5.98	210	4.26	280	3.39
150	5.67	220	4.1	290	3.29
160	5.32	230	3.95	300	3.21
170	5.06	240	3.82	310	3.13

сти с точностью до 1 мкФ. Для питания схемы необходим блок питания, обеспечивающий получение плавно изменяемого напряжения на емкости. Фиксация кривой тока через индуктор (см. рис. 2) производится с применением осциллографа с памятью. Для повышения точности желательно наличие цифровой обработки кривой.

2. Исходными данными для эксперимента являются рабочее напряжение U индуктора и частота f. По значению напряжения U определяется напряжение U<sub>0</sub>, до которого необходимо зарядить разрядную емкость. Путем подбора величины разрядной емкости находится частота, максимально близкая к заданной.
3. По полученной осциллограмме определяются значения I<sub>i</sub> и t<sub>i</sub> для максимально возможного i.
4. Для зафиксированных значений I<sub>i</sub> по таблице 3 с использованием в случае необходимости линейной интерполяции определяются значения R<sub>Ti</sub>.
5. Производится расчет L и R<sub>инд</sub> по формулам (7) и (8).

Полученные по приведенной методике параметры индуктора могут использоваться для определения его КПД, cosφ, а последовательная схема замещения с этими параметрами может применяться при моделировании системы индукционного нагрева.

## Литература

1. Бабат Г. И. Индукционный нагрев металлов и его промышленное применение. М.: Энергия. 1965.
2. Rudnev V., Cook R., Loveless D., Black D. Induction Heat Treatment. Basic Principles, Computation, Coil Construction, and Design Consideration. Modern Power Supplies, Load Matching, Process Control and Monitoring. New York — Basel — Hong Kong. Marcel Dekker Inc. 1997.
3. Болотовский Ю. И., Таназлы Г. И. OrCAD. Моделирование. «Поваренная» книга. М.: Солон-Пресс. 2005.