

# Об одном варианте практической реализации

## системы измерения параметров индукторов установок индукционного нагрева на режимах, близких к номинальным

В журнале «Силовая электроника» № 1 за 2005 год была опубликована статья «Измерение параметров индукторов установок индукционного нагрева на режимах, близких к номинальным», в которой предлагался способ экспериментального измерения параметров индукторов систем индукционного нагрева, разработанный в ООО НПП «Курай» (г. Уфа). Коллега Зоран Лазаревич (Сербия, г. Сврлиг), главный энергетик завода MIN DIV Svrlijig, ознакомился с этой статьей и предложил свой вариант рассматриваемого способа, который приводится в настоящей статье.

**Зоран Лазаревич,**  
дипл. инженер

zoran.lazarevic@minsvrljig.com

**Юрий Болотовский, к. т. н.**

eltech@ufacom.ru

**Леонид Гутин, к. т. н.**

npp.kurai@mail.ru

**Георгий Таназлы, к. т. н.**

g\_thanazly@mail.ru

**Александр Шуляк, к. т. н.**

npp.kurai@mail.ru

Суть предлагаемого в упомянутой статье [1] способа сводилась к тому, что емкость, заряженная до определенного напряжения через тиристорный ключ, состоящий из двух встречно-параллельных тиристоров, разряжалась на индуктор. При этом осциллографировалась кривая затухающего синусоидального тока, проходящего в рассматриваемом контуре. Измеренные по осциллограмме декремент затухания и период колебаний позволяют вычислить индуктивность и активное сопротивление модели индуктора. При этом для уточнения параметров индуктора вводилась погрешность, задаваемая сопротивлениями тиристоров в проводящем состоянии, которые определялись для конкретных типов тиристоров на модели установки, выполненной в среде OrCAD. С целью приближения режимов измерения к реальным режимам работы индуктора величина емкости и напряжение ее заряда определялись методом подбора.

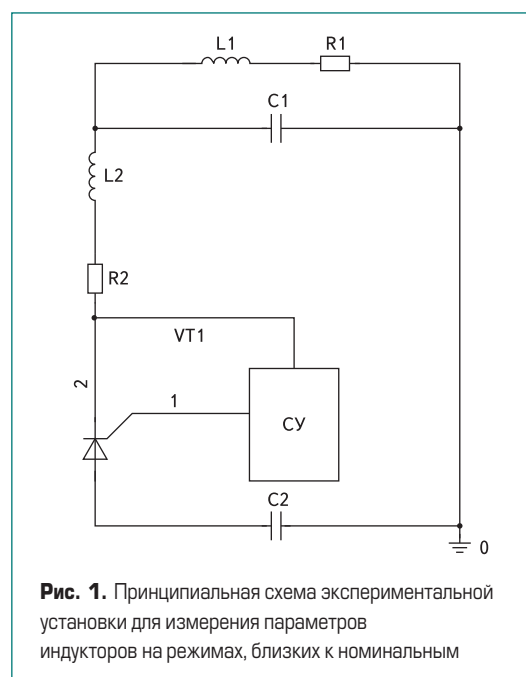
При попытке практической реализации предложенного способа, которую предпринял Зоран Лазаревич, были выявлены следующие трудности.

1. Измерение тока индуктора, который смонтирован в нагревательной установке совместно с компенсирующей емкостью, затруднено из-за проблем монтажа и необходимости использования безындуктивного датчика тока, обеспечивающего его измерение без внесения существенных погрешностей. Общеизвестные методы измерения больших токов с помощью безындуктивного шунта с малым собственным сопротивлением или стандартного трансформатора тока при практической реализации не всегда практически доступны.
2. Определенные сложности представляет использование тиристорного ключа, состоящего из двух

встречно-параллельно включенных тиристоров, требующих соответствующего управления.

3. Построение модели используемых в установке тиристоров и получение на этой модели соответствующих сопротивлений тиристоров в открытом состоянии недоступно для всех желающих реализовать данную установку.

В своей экспериментальной установке Зоран Лазаревич преодолел перечисленные трудности следующим образом (см. принципиальную схему экспериментальной установки на рис. 1).



**Рис. 1.** Принципиальная схема экспериментальной установки для измерения параметров индукторов на режимах, близких к номинальным

В данной схеме колебательный контур, в который входит индуктор с измеряемыми параметрами, представлен емкостью C1, индуктивностью L1 и сопротивлением R1. Емкость C2 является накопительной и заряжается от внешнего источника питания. При этом величина емкости и напряжение ее заряда определяются амплитудой первой полуволны синусоиды напряжения на индукторе. Индуктивность L2 и сопротивление R2 установлены для ограничения крутизны нарастания тока в тиристоре в момент заряда емкости контура C1 от накопительной емкости C2.

Применение данной схемы позволяет не фиксировать осциллограмму тока, заменяя ее на осциллограмму напряжения, что, в конечном счете, дает возможность обойтись без применения датчика тока и сложностей с его установкой в силовом контуре.

Кроме этого, вместо двух тиристорov, используемых в установке, описанной в [1], применяется один тиристор, что упрощает схему.

Управление тиристором осуществляется от системы управления СУ.

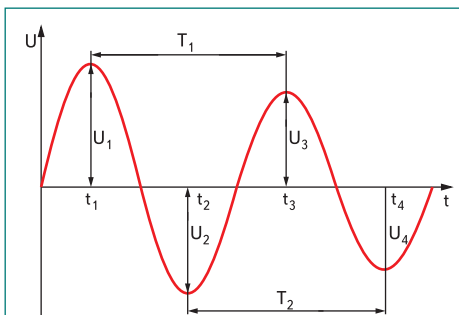
Общеизвестно, что напряжение на емкости в рассматриваемой схеме описывается следующим выражением:

$$U_c = U_0(\omega_0/\omega') e^{-\delta t} \sin(\omega' t + \gamma), \quad (1)$$

где  $\delta = R/2L$ ;

$$\begin{aligned} \omega' &= \sqrt{(1/LC) - \delta^2}; \\ \omega_0 &= \sqrt{1/LC}; \\ \text{tg} \gamma &= \omega_0/\delta \end{aligned}$$

На рис. 2 приведена кривая затухающего синусоидального напряжения на индукторе.



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

Определим декремент затухания по напряжению

$$\Delta U = U_1/U_3 \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \Delta U &= \frac{U_0 \frac{\omega_0}{\omega'} e^{-\delta t_1} \sin(\omega' t_1 + \gamma)}{U_0 \frac{\omega_0}{\omega'} e^{-\delta(t_1+T)} \sin(\omega'(t_1+T) + \gamma)} = \quad (3) \\ &= e^{\delta T} \end{aligned}$$

То есть полученное значение величины декремента затухания по напряжению  $\Delta U$  равно значению декремента затухания по току  $\Delta I$  [1], что позволяет повторить выкладки, приведенные в [1].

Из (3), логарифмируя и преобразуя, получим:

$$\delta = R/2L = (1/T) \ln \Delta U. \quad (4)$$

Далее

$$\omega' = \frac{2\pi}{T} = \sqrt{\frac{1}{LC} - (\ln \Delta U)^2} \frac{1}{T^2}.$$

Отсюда

$$\frac{4\pi^2}{T^2} = \frac{1}{LC} - \left(\frac{\ln \Delta U}{T}\right)^2. \quad (5)$$

Из (5) получим:

$$1/LC = 1/T^2 \times (4\pi^2 + \ln^2 \Delta U) \quad (6)$$

Считая C известным, из (6) получим L:

$$L = T^2 / [C (4\pi^2 + \ln^2 \Delta U)]. \quad (7)$$

Из (7) и (4) получим R:

$$R = \frac{2T \ln \Delta U}{C(4\pi^2 + \ln^2 \Delta U)} \quad (8)$$

Таким образом, по полученным из осциллограммы затухающего синусоидального напряжения на индукторе декременту затухания по напряжению и периоду посредством формул (7) и (8) вычисляются параметры индуктора L и R.

На рис. 3 приведена схема PSpice-модели рассматриваемой экспериментальной установки.

В схеме применен тиристор TB233-320-15. PSpice-модель этого тиристора, построенная по паспортным данным, выглядит следующим образом:

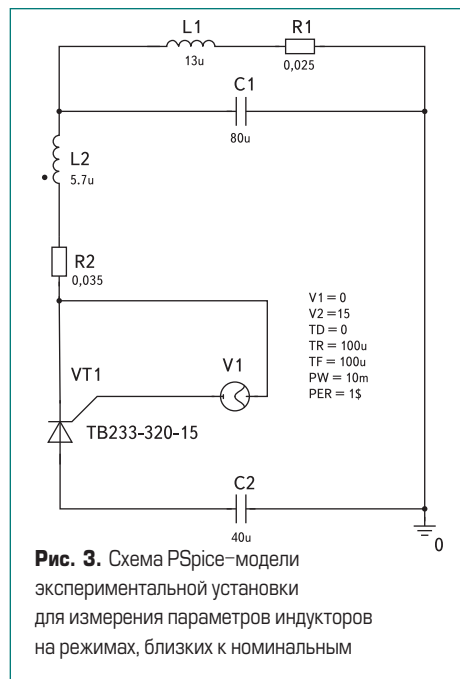
```
.subckt TB233-320-15 anode gate cathode
* "Typical" parameters
X1 anode gate cathode Scr params:
+Vdrm=1500v
+Vrrm=1500v
+Ih=500ma
+Vtm=2.1v
+Itm=1005
+dvdvt=0.5e9
+Igt=250ma
+Vgt=2.5v
+Tton=3.2u
+Ttoff=10us
+Idrm=40ma
* 07-8-1 Kurai & MIN DIV Svrjlg
.ends
```

Система управления моделируется источником напряжения VPULSE.

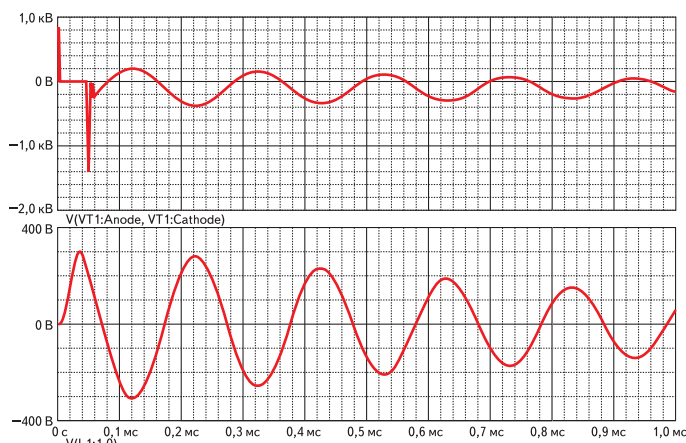
Параметры элементов схемы видны на рис. 3.

На рис. 4 приведены осциллограммы напряжения на тиристоре (верхняя кривая) и напряжения на индукторе (нижняя кривая).

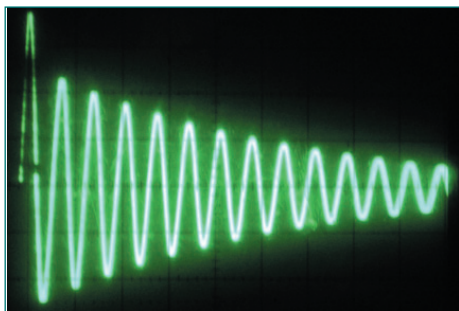
Из осциллограмм видно, что тиристор, обеспечивающий заряд емкости C1, закрывается в момент времени  $t = 22$  мкс. С этого времени контур C1L1R1 отключен от накопительной емкости C2 и тиристор практически не вносит по-



**Рис. 3.** Схема PSpice-модели экспериментальной установки для измерения параметров индукторов на режимах, близких к номинальным



**Рис. 4.** Осциллограммы напряжения на тиристоре и индукторе на модели экспериментальной установки для измерения параметров индукторов на режимах, близких к номинальным



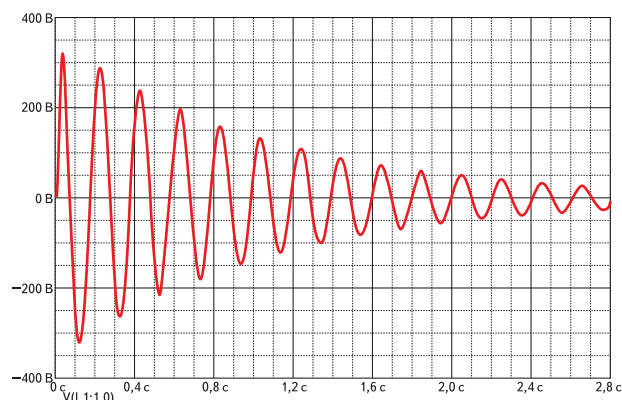
**Рис. 5.** Экспериментальная осциллограмма напряжения на индукторе

грешностей в измерение параметров индуктора. Для ограничения перенапряжений на тиристоре параллельно к нему присоединяется защитная RLD цепочка ( $C = 0,3$  мкФ,  $R = 20$  Ом), которая на схемах не указывается.

Для рассматриваемых осциллограмм  $U_1 = 180,8$  В,  $U_3 = 148,9$  В,  $T = 202,3$  мкс. Отсюда  $\Delta_U = U_1/U_3 = 1,214$ . По этим данным в соответствии с формулами (7) и (8), считая величину  $C1$  заданной и равной  $80$  мкФ, получим:  $L1 = 12,99$  мкГн,  $R1 = 0,0248$  Ом, что с высокой степенью точности соответствует параметрам модели.

Естественно, что точность измерения величин  $U_1$ ,  $U_3$  и  $T$  по кривым, полученным с осциллографа, будет ниже, но, тем не менее, экспериментальные данные показывают, что она является вполне удовлетворительной.

На рис. 5 и 6 представлены экспериментально полученная осциллограмма напряжения на индукторе и полученная на модели осциллограмма этого же напряжения (повторение ниж-



**Рис. 6.** Расчетная осциллограмма напряжения на индукторе

ней осциллограммы, приведенной на рис. 4 при другой длительности развертки). Соотношения амплитудных напряжений 2-й и 3-й положительных полуволн на экспериментальной и расчетной осциллограммах с точностью до первого знака после запятой совпадают и равны 1,2.

Первый положительный полупериод колебаний на экспериментальной осциллограмме и осциллограмме, полученной в результате моделирования, характеризует процесс заряда емкости  $C1$  колебательного контура от накопительной емкости  $C2$ . В контуре заряда участвуют тиристор, индуктивность  $L2$  и резистор  $R2$ . Использовать эту полуволну для вычисления декремента затухания нельзя, так как она характеризует колебания в системе, отличной от исследуемого колебательного контура  $L1, C1, R1$ . К началу формирования пер-

вой отрицательной полуволны на осциллограммах тиристор отключается. При этом погрешности от сопротивления тиристора в открытом состоянии в измерения не вносятся.

Таким образом, предложенная Зораном Лазаревичем схема экспериментального измерения параметров индуктора улучшает предложенную в [1] схему за счет упрощения фиксации затухающего колебательного процесса и исключения погрешностей, вносимых в цепь измерения тиристорами.

## Литература

1. Болотовский Ю. И., Гутин Л. И., Таназлы Г. И., Шуляк А. А. Измерение параметров индукторов установок индукционного нагрева на режимах, близких к номинальным // Силовая электроника. 2005. № 1.