

## ИЗМЕРЕНИЕ ТОКА ИНДУКТОРА ПРИ ИНДУКЦИОННОЙ НАПЛАВКЕ

В.П. Тимошенко, В.В. Иванайский, О.И. Хомутов

*В статье рассматривается методика измерения тока индуктора при индукционной наплавке. Предложенная методика позволяет технологам при разработке технологического процесса наплавки расчетным путем определить величину удельной тепловой мощности, выделяемой в детали и управлять термическим циклом наплавки.*

*Ключевые слова: индукционная наплавка, индуктор, высокочастотный генератор, ток, удельная мощность.*

Качество деталей, упроченных методом индукционной наплавки, зависит от скорости, продолжительности и конечной температуры нагрева упрочняемой поверхности [1, 2, 3]. Эти параметры в основном определяются величиной удельной мощности  $P_0$ , определяемой в наплавляемой детали индуктируемым в ней током и которая для синусоидального тока определяется выражением [4, 5]:

$$P_0 = 0,993 \cdot 10^{-3} H_{me}^2 \sqrt{\rho \mu f}, \frac{Bm}{m^2}, \quad (1)$$

где  $H_{me}$  – амплитуда напряженности синусоидального магнитного поля на поверхности детали, А/м;

$\rho$  – удельное сопротивление, Ом·м;

$\mu$  – относительная магнитная проницаемость металла;

$f$  – частота, Гц.

Для случая ярко выраженного поверхностного эффекта, который имеет место при индукционной наплавке, амплитуда напряженности магнитного поля на поверхности

$$H_{me} \approx \frac{I_u^a}{\epsilon}$$

где:  $I_u^a$  – амплитудное значение тока индуктора;

$\epsilon$  – расстояние между наплавляемой поверхностью и параллельной ей ветвью индуктора.

Тогда выражение (1) можно представить в виде

$$P_0 = 10^{-3} \frac{(I_u^a)^2 \sqrt{\rho \mu f}}{\epsilon^2}, \frac{Bm}{m^2}. \quad (2)$$

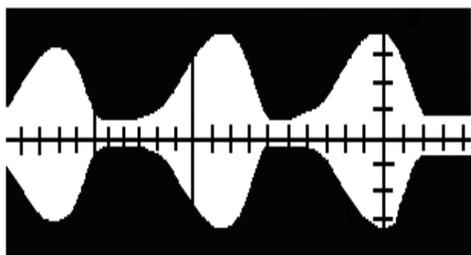
Отсюда следует, что основным технологическим параметром, который можно использовать для управления величиной удельной мощности, является ток индуктора.

Выпускаемые промышленностью высокочастотные генераторы, используемые при индукционной наплавке, не имеют приборов, позволяющих контролировать величину тока индуктора, а показания имеющихся щитовых приборов (режим лампы и напряжение на нагрузочном контуре) не связаны однозначно с величиной тока в индукторе. Проведенные исследования режимов работы генераторов при наплавке однотипных деталей на одинаковых генераторах показали, что при одном и том же времени наплавки показания щитовых приборов отличаются на 20...30 %, что ведет к дополнительным трудностям при установке требуемых режимов генератора.

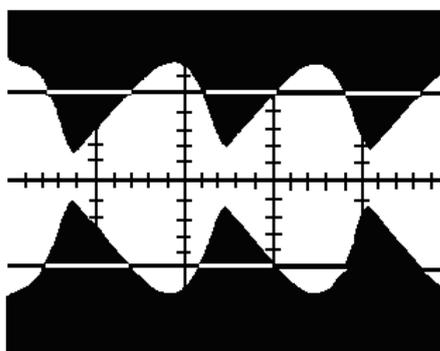
При индукционной наплавке ток в индукторе достигает нескольких тысяч ампер, имеет много гармоник основной частоты, равной обычно 66 или 440 кГц. Частота тока нестабильна в переходных режимах. Ток основной частоты модулирован по амплитуде с частотой пульсаций анодного напряжения генератора, и глубина модуляции зависит от величины тока. Все сказанное относится и к напряжению на индукторе. На рисунке 1 приведены осциллограммы напряжения на индукторе, снятые при различных эффек-

тивных значениях  $U_u^{\text{эф}}$ . Такие токи и напряжения необходимо измерять с помощью специальных приборов, по-

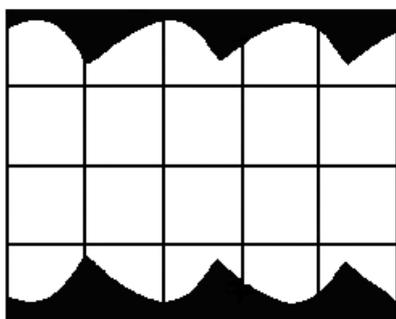
строенных на основе преобразователей среднеквадратичного (эффективного) значения измеряемой величины.



а



б



в

Рисунок 1 – Осциллограммы напряжения  $U_u^{\text{эф}}$  на индукторе при его различных эффективных значениях (масштаб: развертки – 2 мс/см, напряжения – 160 В/см):  
а – 40 В; б – 100 В; в – 150 В

В общем случае мощность, выделяющаяся в поверхностном слое нагреваемого металла, определяется среднеквадратичным значением протекающего по индуктору тока независимо от его спектрального состава. Существующие амперметры среднеквадратичного значения имеют огра-

ниченный диапазон измерений и не могут быть применены для измерения реальных величин тока, имеющих место при индукционной наплавке. Косвенные методы измерения среднеквадратичного значения тока (например, калориметрический) дают усредненную по всей длительности процесса величину тока, что не позволяет судить о характере его изменений.

На рисунке 2 приведена схема измерения тока индуктора с использованием делителя тока, имеющего коэффициент деления, не зависящий от изменения частоты и формы огибающей тока в переходных процессах. Он представляет собой пассивную RL – цепь, подключенную к участку индуктора. При этом должны выполняться соотношения:

$$(3) \quad \omega L_u \gg R_u; \quad \omega L \gg R; \quad L \gg L_u; \quad \omega \ll \omega_o,$$

где  $\omega$  – основная частота тока;  
 $\omega_o$  – собственная резонансная частота катушки L.

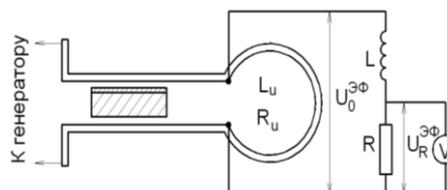


Рисунок 2 – Схема измерения тока индуктора

Необходимо отметить, что участок индуктора, к которому подключена RL – цепь, должен находиться как можно дальше от находящейся в индукторе наплавляемой детали, для того чтобы исключить появление дополнительного сопротивления на этом участке, вызванного индуктивной связью токов в индукторе и детали. При соблюдении соотношений (3) ток в RL – цепи I и ток в индукторе  $I_u$  распределяются обратно пропорционально величинам L и  $L_u$ :

$$\frac{I}{I_u} = \frac{L_u}{L}. \quad (4)$$

Напряжение  $U_R$  на резисторе R пропорционально току индуктора и совпадает с ним по фазе:

$$U_R \frac{L}{L_u R} = I_u. \quad (5)$$

Так как равенства (4) и (5) справедливы для мгновенных значений тока и напряжения, то для их эффективных значений будет справедливо равенство:

$$I_u^{\text{эф}} = K U_R^{\text{эф}}, \quad (6)$$

где  $K = \frac{L}{L_u R}$ .

Напряжение  $U_R^{\text{эф}}$  можно измерить с помощью вольтметра среднеквадратичных значений. Однако величина  $L_u$  у используемых при наплавке в основном одновитковых индукторов весьма мала, и ее измерение связано с большими экспериментальными трудностями, поэтому определение величины  $K$  по формуле (7) затруднительно.

Значение  $K$  можно определить экспериментально. Так как соотношение (6) справедливо для любых значений  $I_u^{\text{эф}}$ , то производится измерение тока индуктора в допустимых для используемого прибора пределах и величины пропорционального ему напряжения  $U_R^{\text{эф}}$ . Схема измерения не содержит нелинейных элементов, поэтому полученное значение  $K$  неизменно и для других значений тока индуктора.

RL – цепь проверялась на соответствие расчетному соотношению

$$\frac{U_L^{\text{эф}}}{U_R^{\text{эф}}} = \frac{\omega L}{R}, \quad (7)$$

( $U_L^{\text{эф}}$  и  $U_R^{\text{эф}}$  – величины напряжения на элементах  $L$  и  $R$  соответственно) в диапазоне частот 30...120 кГц по схеме, представленной на рисунке 3. В RL – цепь подавалось напряжение от генератора синусоидальных сигналов и измерялось падение напряжения на элементах  $R$  и  $L$ . На разных частотах определялось отношение  $\frac{U_L^{\text{эф}}}{U_R^{\text{эф}}}$  и рассчитывалась величина  $\frac{\omega L}{R}$ .

Результаты экспериментов и расчета приведены на рис. 4(а–г).

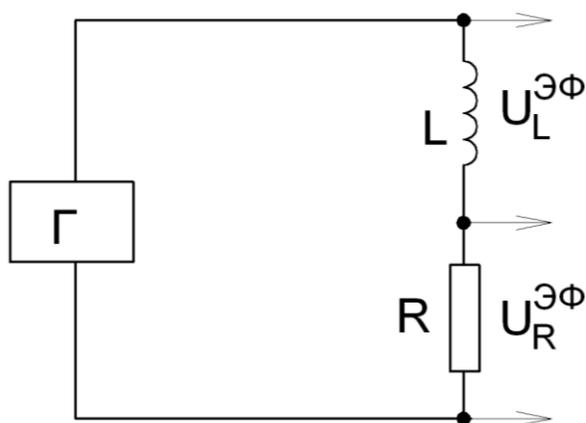


Рисунок 3 – Схема проверки соответствия параметров RL – цепи расчетным величинам (Г – генератор синусоидальных сигналов)

Схема измерения тока (см. рисунок 2) была проверена также на линейность. Для этого индуктор подключался к высокочастотному генератору ВЧГ2-100/0,066, и определялась зависимость между среднеквадратичными значениями напряжения  $U_R^{\text{эф}}$  на резисторе  $R$  и напряжения на выбранном участке индуктора  $U_o^{\text{эф}}$ . Полное напряжение на индукторе изменялось от нуля до максимума. Результаты эксперимента (рисунок 4, б) свидетельствуют о линейной зависимости  $U_R^{\text{эф}}$  и  $U_o^{\text{эф}}$ , хотя при изменении эффективного значения напряжения на индукторе меняется форма огибающей высокочастотного напряжения, а значит, и содержание гармоник в токе.

Для определения величины  $K$  индуктор с делителем тока подключался через делитель напряжения к генератору ВЧГ2–100/0,066. При этом измерялся ток индуктора и напряжение на резисторе  $R$ . Как видно из приведенных на рис. 4, в результатов эксперимента, регистрируемое напряжение пропорционально току индуктора.

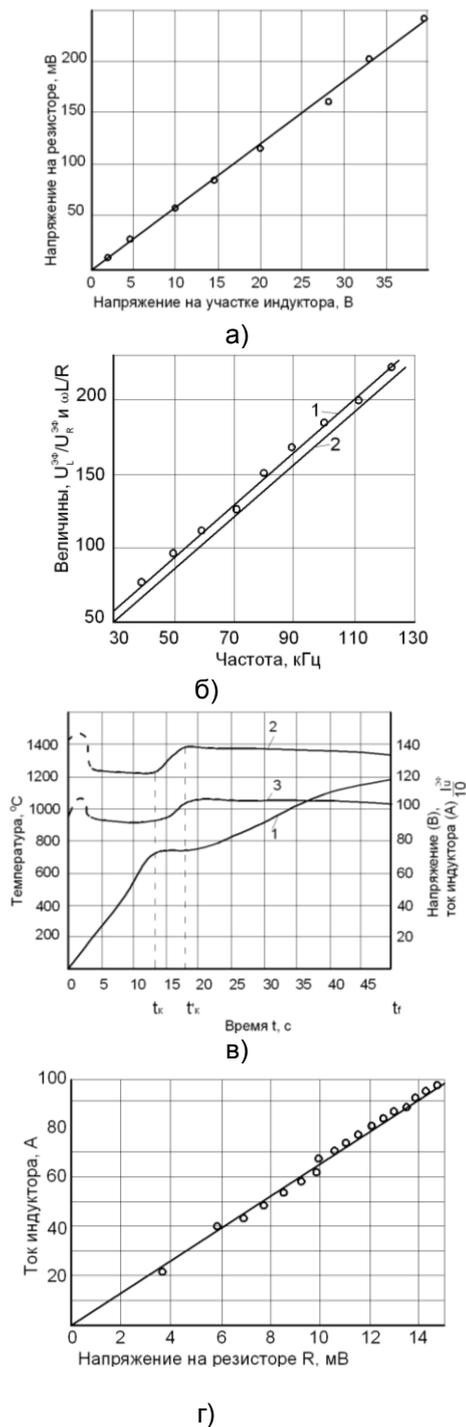


Рисунок 4 – Экспериментальные зависимости:

а – величин  $\frac{UL^{эф}}{U_R^{эф}}$  и  $\frac{\omega L}{R}$  от частоты:

1 – экспериментальная  $(\frac{UL^{эф}}{U_R^{эф}})$ ,

$\frac{\omega L}{R}$   
 2 расчетная  $(\frac{\omega L}{R})$ ;  
 б – между среднеквадратичными значениями напряжения на резисторе  $U_R^{эф}$  и напряжения на участке индуктора  $U_o^{эф}$ ;  
 в – между среднеквадратичными значениями тока индуктора  $I_i$  и напряжения на резисторе  $U_R^{эф}$ ;  
 г – изменение температуры на плавляемой поверхности металла, напряжения и тока индуктора в процессе индукционной наплавки:  
 1 – температура наплавляемой поверхности; 2 – ток индуктора; 3 – напряжение на индукторе

Для определения величины К индуктор с делителем тока подключался через делитель напряжения к генератору ВЧГ2–100/0,066. При этом измерялся ток индуктора и напряжение на резисторе  $R$ . Как видно из приведенных на рисунке 4, в результатов эксперимента, регистрируемое напряжение пропорционально току индуктора.

Каждый индуктор, используемый для наплавки, требует индивидуальной тарировки и определения соответствующего значения К.

Описанная методика позволяет определить ток индуктора при любых режимах работы высокочастотного генератора.

Проведенная оценка погрешности измерений показывает, что она определяется погрешностями приборов и составляет  $\pm 3,5\%$ , что достаточно для применения в большинстве случаев.

На рисунке 4,г показано изменение тока индуктора, измеренного по описанной методике, напряжения на зажимах индуктора и температуры наплавляемой поверхности в процессе наплавки.

Пунктирные участки кривых соответствуют переходным процессам в генераторе и измерительных приборах и поэтому не соответствуют физической картине происходящих явлений.

В интервале времени  $(0, t_k)$  происходит нагрев поверхности детали от начальной температуры до точки Кюри. Уменьшение тока и напряжения обусловлено возраставанием активного

сопротивления нагреваемого металла в поверхностном слое, определяемом "холодной" глубиной проникновения тока  $\xi_x$ . Далее, образовавшийся в момент  $t_k$  парамагнитный слой расширяется в интервале времени ( $t_k, t_k'$ ) до величины, определяемой "горячей" глубиной проникновения тока  $\xi_r$ . При этом уменьшается индуктивное сопротивление загруженного индуктора и возрастают протекающий по нему ток и напряжение. В интервале времени ( $t_k', t_f$ ) индуктивное сопротивление индуктора остается неизменным, происходит плавный спад тока и напряжения за счет продолжающегося увеличения удельного активного сопротивления нагреваемого металла в слое, определяемом величиной  $\xi_r$ .

Разработанная методика, основанная на применении стандартных измерительных приборов, позволяет измерять ток индуктора в диапазонах номинальных токов нагрузки высокочастотных генераторов.

Методика может быть использована при получении исходных данных для расчета тепловых полей в наплавляемой детали и слое шихты, математического моделирования процесса индукционной наплавки с целью его оптимизации.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ткачев В.Н. Индукционная наплавка твердых сплавов / В.Н. Ткачев, Б.М. Фиштейн, Н.В. Казинцев, Д.А. Алдырев. – М.: Машиностроение, 1970.– 183 с.
2. Боль А.А. Оптимизация процесса индукционной наплавки / А.А. Боль, В.Н. Коваль, В.П. Тимошенко, С.П. Лесков, В.П. Шерышев // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук.– 1985.– № 10, вып. 2.
3. Боль А.А. Повышение качества индукционной наплавки путем оптимизации и автоматизации нагрева / А.А. Боль, В.П. Тимошенко, В.Н. Коваль // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук.– вып. 1.
4. Слухоцкий А.Е. Индукторы для индукционного нагрева / А.Е. Слухоцкий, С.Е. Рыскин. – Л.: Энергия, 1974.– 264 с.
5. Слухоцкий А.Е. Установки индукционного нагрева / А.Е. Слухоцкий, В.С. Немков, Н.А. Павлов, А.В. Бамунэр; Под ред. А.Е. Слухоцкого. – Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1981.– 328 с.

**Тимошенко В.П.**, к.т.н., доцент,  
тел. 8(3852)29-07-65,  
E-mail:timvlad53@mail.ru.

**Хомутов О.И.**, д.т.н., профессор,  
ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»,

**Иванайский В.В.** к.т.н., соискатель ученой степени д.т.н.,  
ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный аграрный университет».