

## ИСТОЧНИК МОЩНОСТИ ДЛЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ ПОВТОРЯЮЩИХСЯ ИМПУЛЬСОВ ТОКА В СИСТЕМАХ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА

**А.В. Гнатов, профессор, д.т.н., О.С. Сабокар, преп. стажер,  
А.В. Калиниченко, студент, ХНАДУ,  
О.А. Ульянец, менеджер по персоналу, Program-Ace, Харьков**

***Аннотация.** Проведен теоретический анализ и численные оценки протекающих электромагнитных процессов в источнике мощности для возбуждения повторяющихся импульсов тока в системах индукционного нагрева. Построены временные зависимости напряжений и токов. Показано, что резонанс токов в обмотке индуктора определяется только частотой следования возбуждающих импульсов.*

***Ключевые слова:** индукционный нагрев, индукторная система, индуцированный ток, электромагнитные процессы, вихревые токи, нагрев металла.*

## ДЖЕРЕЛО ПОТУЖНОСТІ ДЛЯ ЗБУДЖЕННЯ ІМПУЛЬСІВ СТРУМУ, ЩО ПОВТОРЮЮТЬСЯ В СИСТЕМАХ ІНДУКЦІЙНОГО НАГРІВУ

**А.В. Гнатов професор, д.т.н., О.С. Сабокар, викл. стажист,  
А.В. Калініченко, студент, ХНАДУ,  
О.А. Ул'янець, менеджер з персоналу, Program-Ace, Харків**

***Анотація.** Проведено теоретичний аналіз і чисельні оцінки електромагнітних процесів, що протікають в джерелі потужності для збудження імпульсів струму, що повторюються в системах індукційного нагріву. Побудовано часові залежності напруг і струмів. Показано, що резонанс струмів в обмотці індуктора визначається тільки частотою проходження імпульсів, що збуджуються.*

***Ключові слова:** індукційний нагрів, індукторна система, струм, що індукується, електромагнітні процеси, вихрові струми, нагрів металу.*

## POWER SOURCE FOR EXCITATION OF REPEATED CURRENT PULSES IN INDUCTION HEATING SYSTEM

**A. Gnatov, professor, dr. eng. sc., O. Sabokar, assistant of teacher,  
A. Kalinichenko, student, KhNAHU, O. Ulyanets, HR manager, Program-Ace, Kharkiv**

***Abstract.** The theoretical analysis and the numerical estimation of electromagnetic processes occurring in the power source for excitation of repeated current pulses in induction heating system were carried out. The time dependences of voltages and currents were built. It was shown that current resonance in inductor winding is determined only by repetition frequency of exciting pulses.*

***Key worlds:** induction heating, induction system, induced current, electromagnetic processes, eddy currents, metal heating.*

### Введение

**Постановка проблемы.** Индукционный нагрев (ИН) – это нагрев металлических объек-

тов, называемых заготовками, электрическими токами. Последние индуцируются переменным магнитным полем индуктора (одновитковым или многовитковым соленоидом).

Протекание вихревых токов сопровождается выделением Ленц-Джоулева тепла, что приводит к разогреву металлического объекта [1]. Данный эффект нашёл широкое применение в промышленности для выполнения целого ряда производственных операций, например, по закалке поверхностей металлических изделий, бесконтактному разогреву жидкостей, левитационной плавке металлов и др [1-6].

### Анализ основных источников и публикаций

Принципиальная схема оборудования для реализации большинства обрабатывающих технологий, как правило, должна содержать две важнейших составляющих: инструмент для выполнения заданной производственной операции и источник мощности, энергия которого обеспечивает работу собственно инструмента [2 - 4 7]. Разделение на источник мощности и инструмент в системах ИН весьма условно, поскольку индуктор с заготовкой входят в состав контура с конденсаторной батареей, рассчитанного на определённую рабочую частоту электромагнитных колебаний. Простейшее схемотехническое представление системы ИН показано на рис.1 Раскачку LC-контура, как правило, осуществляют с помощью генераторов, выполненных использованием полупроводниковых электронных ключей. На установках с рабочей частотой до 300 кГц используют инверторы на IGBT-сборках или MOSFET-транзисторах [8, 9].

Схема генератора может быть в принципе любой. Это может быть мультивибратор, RC-генератор, генератор с независимым возбуждением, различные релаксационные генераторы и др.

Физически, раскачка LC-контура соответствует достижению резонанса токов в схеме из параллельных индуктивности и ёмкости. Как известно, это явление имеет место при совпадении собственной частоты контура и частоты возбуждающего сигнала [1, 6]

### Цель и постановка задачи

Цель работы – теоретический анализ и численные оценки протекающих электромагнитных процессов в источнике мощности для возбуждения повторяющихся импульсов тока в системах индукционного нагрева.

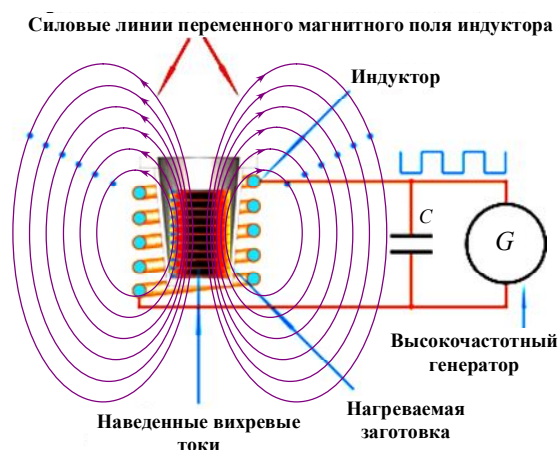


Рис.1. Схема работы системы индукционного нагрева

### Функциональная схема системы индукционного нагрева

Простейшая функциональная схема системы индукционного нагрева приведена на рис.2.

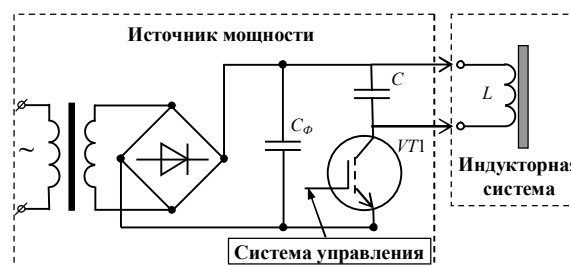


Рис. 2. Функциональная схема системы индукционного нагрева

Цепь питания состоит из мостовой схемы выпрямителя синусоидального тока от сети промышленной частоты с последующим использованием буферной емкости  $C_\phi$  в качестве сглаживающего фильтра. Индуктор  $L$  с металлической заготовкой включается в цепь схемы параллельно емкости  $C$ . Они образуют колебательный контур характеризующийся значением резонансной частоты  $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ .

Электронный ключ  $VT1$  служит для формирования токовых импульсов, следующих с частотой, необходимой для возбуждения резонансных колебаний электромагнитной энергии в LC-контуре.

Работа системы. Сигнал от сети, амплитуда которого может регулироваться промежуточным трансформатором, подаётся на входные клеммы выпрямителя. Выпрямленный сигнал с помощью системы управления и

электронного ключа – транзистора VT1 преобразуется в последовательность импульсов, следующих с определённой частотой. При равенстве её и резонансной частоты LC-контура в схеме последнего возбуждаются электромагнитные колебания. Ток в обмотке индуктора резко возрастает. При этом ток, формируемый электронным ключом, довольно мал, но достаточен для поддержания резонансных колебаний и высоких амплитуд тока в обмотке индуктора индукторной системы.

Основные элементы индукторной системы и их работа представлены на рис. 3. По индуктору протекают импульсы тока, которые вызывают вокруг него переменное импульсное магнитное поле. Последнее наводит вихревые токи Фуко в токопроводящем металле. Протекание наведенного тока в металле с определенным омическим сопротивлением и обуславливает его нагрев.

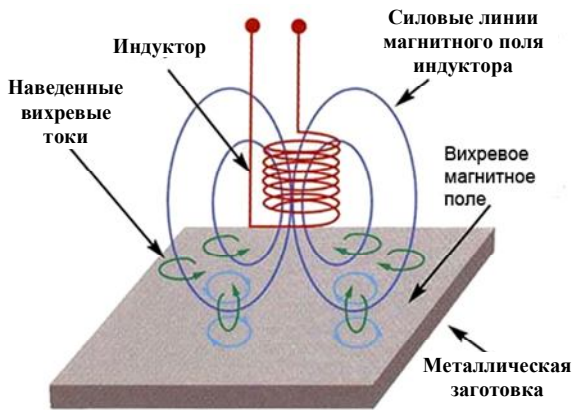


Рис. 3. Принцип действия индукторной системы для индукционного нагрева

**Возбуждение системы периодически повторяющимися импульсами тока**

Для оценки характеристик процессов в цепи индуктора воспользуемся схемой замещения, представленной на рис. 4.

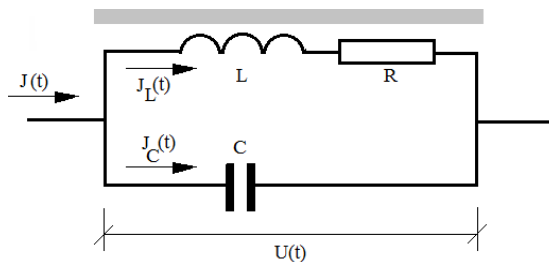


Рис.4. Схема замещения резонансного контура с обмоткой индуктора

Последовательность возбуждающих импульсов, формируемую с помощью электронного ключа и поступающую на вход резонансного контура, опишем временной зависимостью, представленной на рис.5.

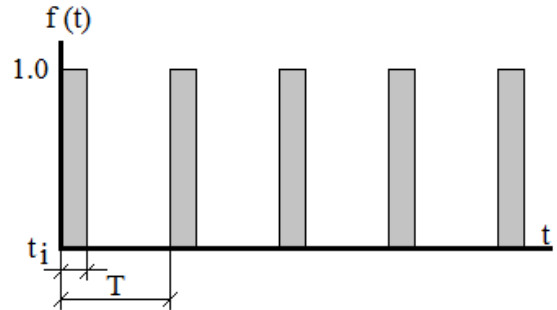


Рис. 5. Последовательность токовых импульсов на входе резонансного контура,  $T$  – период повторения,  $t_i$  – длительность импульса.

Математически зависимость на рис.5 можно представить линейной комбинацией ступенчатых функций:

$$f(t) = \sum_{n=0}^N [\eta(t - n \cdot T) - \eta(t - (n \cdot T + t_i))], \quad (1)$$

где  $n$  – номер импульса в последовательности,  $N$  – число импульсов.

Рассмотрение проведём для различных возможных режимов работы источника мощности:

а) возбуждение импульсами тока с постоянной амплитудой,

$$J(t) = J_m \cdot f(t), \quad J_m = \text{const}$$

б) возбуждение импульсами напряжения с постоянной амплитудой,

$$U(t) = U_m \cdot f(t), \quad U_m = \text{const}$$

В первом режиме ток, поступающий на вход LC-контура, поддерживается неизменным вне зависимости от выполнения или не выполнения условий резонанса.

Для практики данный режим, в первую очередь, интересен с точки зрения безопасной работы электронного ключа и, соответственно, возможных амплитуд тока в индукторе.

В режиме, когда напряжение на входе контура поддерживается постоянным, возможны существенные колебания величины тока в цепи электронного ключа, что может привести к его выходу из строя. Здесь важно определить допустимые диапазоны амплитуд возбуждающего и возбуждаемых токов в режиме и вне его.

Рассмотрим возбуждение импульсами тока с постоянной амплитудой,  $J(t) = J_m \cdot f(t)$ ,  $J_m = \text{const}$ .

Основные выражения для токов и напряжений в схеме на рис. 4, преобразованные по Лапласу с учётом нулевых начальных условий, имеют вид [10]:

$$\begin{cases} U(p) = (pL + R) \cdot J_L(p), \\ U(p) = \frac{1}{pC} \cdot J_C(p), \\ J(p) = J_L(p) + J_C(p). \end{cases} \quad (2)$$

где  $p$  – параметр преобразования,

$$\begin{aligned} U(p) &= L\{U(t)\}, J_L(p) = L\{J_L(t)\}, J_C(p) = \\ &= L\{J_C(t)\}, J(p) = L\{J(t)\}. \end{aligned}$$

Из системы уравнений (2) находим  $L$  – образы напряжения и тока в индукторе.

$$\begin{cases} U(p) = \frac{(pL + R)}{(p + \delta)^2 + \omega^2} \cdot \omega_0^2 \cdot J(p), \\ J_L(p) = \frac{1}{(p + \delta)^2 + \omega^2} \cdot \omega_0^2 \cdot J(p), \end{cases} \quad (3)$$

где  $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$  – частота колебаний,

$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$  – собственная частота контура,

$\delta = \frac{R}{2L}$  – декремент затухания.

Осуществляя обратное преобразование Лапласа в выражениях (3), после введения новых обозначений получим следующие расчётные соотношения [11]:

а) напряжение на индукторе,

$$U(t) = U_m \cdot \eta \cdot \int_0^{\tau} f(x) \cdot e^{-\delta_0 2\pi\eta(\tau-x)} \times \\ \times [\cos(2\pi\eta(\tau-x)) + \delta_0 \sin(2\pi\eta(\tau-x))] dx \quad (4)$$

где  $U_m = \frac{2\pi}{\omega_0 C} \cdot J_m = 2\pi \cdot Z_w \cdot J_m$  – амплитуда,

$Z_w = \sqrt{\frac{L}{C}}$  – волновое сопротивление контура,

$\eta = \frac{\omega}{\left(\frac{2\pi}{T}\right)}$  – отношение частоты колебаний к

частоте следования возбуждающих импульсов,  $\tau = \frac{t}{T}$  – текущее время относительно периода повторения возбуждающих импульсов,

$\delta_0 = \frac{\delta}{\omega}$  – относительный декремент затухания;

б) ток в индукторе,

$$J_L(t) = J_{Lm} \cdot \eta \cdot \int_0^{\tau} f(x) \cdot e^{-\delta_0 2\pi\eta(\tau-x)} \times \\ \times \sin(2\pi\eta(\tau-x)) dx \quad (5)$$

где

$$J_{Lm} = 2\pi \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 \cdot J_m = 2\pi \cdot \left(1 - \left(\frac{0,5R}{Z_w}\right)^2\right) \cdot J_m -$$

амплитуда.

Из выражения для амплитуды тока в индукторе следует условие, при выполнении которого она принимает наибольшее значение, равное  $J_{mL}^{(\eta\delta)} \approx 2\pi \cdot J_m$  :

$$\left(\frac{0,5R}{Z_w}\right)^2 \ll 1. \quad (6)$$

Для удобства при проведении вычислений и «прозрачности» дальнейших обобщений формулы (4) и (5) запишем в относительных величинах, нормированных на соответствующие амплитудные значения.

$$U_0(t) = \frac{U(t)}{U_m} = \eta \cdot \int_0^{\tau} f(x) \cdot e^{-\delta_0 2\pi\eta(\tau-x)} \times$$

$$\times [\cos(2\pi\eta(\tau-x)) + \delta_0 \sin(2\pi\eta(\tau-x))] dx. \quad (7)$$

$$J_{L0}(t) = \frac{J_L(t)}{J_{Lm}} = \eta \cdot \int_0^\tau f(x) \times e^{-\delta_0 2\pi\eta(\tau-x)} \cdot \sin(2\pi\eta(\tau-x)) dx \quad (8)$$

Выражения (6) и (7) с подстановкой конкретного вида временной функции возбуждающего тока (1) представляют собой зависимости, позволяющие провести численную оценку характеристик процессов в индукторе при постоянстве амплитуд возбуждающего тока.

### Численные оценки

Первая группа оценок возбуждаемых напряжений и токов, вычисленных в пренебреже-

нии активным сопротивлением проводов обмотки индуктора ( $R \approx 0$ ), представлена на графиках рис. 4 и рис. 5.

### Основные результаты

Рассмотренная идеализация позволяет оценить предельно максимальные возможности принятой схемы источника мощности при постоянной величине возбуждающего тока.

Как следует из рис. 6,а,б, при выполнении резонансных условий, когда частота следования импульсов строго совпадает с собственной частотой LC – контура, ток в индукторе и напряжение на его входных клеммах существенно возрастают (указание конкретных численных показателей не имеет смысла, поскольку в принятой идеализации имеет место рост до бесконечности).

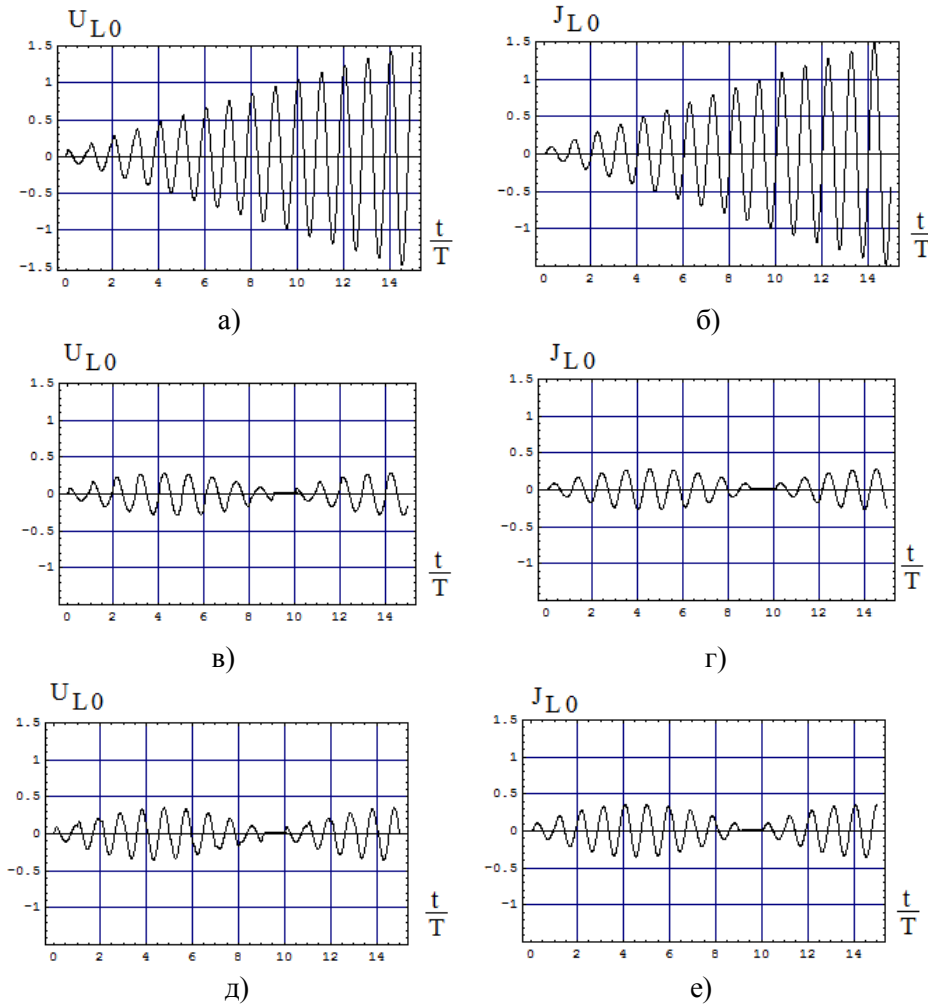


Рис. 6. Временные зависимости напряжений и токов, возбуждаемых импульсами длительностью  $t_i = 0,1$  в отсутствие активного сопротивления обмотки при различных соотношениях резонансной частоты и частоты следования возбуждающих импульсов тока  $\eta$ : а) напряжение, б) ток – в резонансе,  $\eta = 1$ ; в) напряжение; г) ток – при повышении частоты следования относительно резонансной частоты,  $\eta = 0,9$ ; д) напряжение; е) ток – при понижении частоты следования относительно резонансной частоты,  $\eta = 1,1$

Как видно из сравнения графиков на рис. 6,а-б и рис. 6,в-е, при 10%-ном отклонении частоты следования импульсов от резонансной частоты  $LC$  – контура в сторону увеличения или уменьшения, амплитуды возбуждаемых сигналов резко падают, хотя их временная форма остаётся квазипериодичной.

Сравнение графических зависимостей на рис. 6,а-б и рис.7 показывает, что процесс резонансного возбуждения электромагнитных колебаний в  $LC$  – контуре не зависит от длительности собственно возбуждающих импульсов.

Обобщение вышеотмеченных результатов приводит к выводу: резонанс токов в обмотке индуктора определяется исключительно частотой следования возбуждающих импульсов и не зависит от длительности каждого из них.

Следующая группа оценок возбуждаемых напряжений и токов посвящена оценкам влияния реального активного сопротивления проводов обмотки индуктора ( $R \neq 0$ , графики на рис.8).

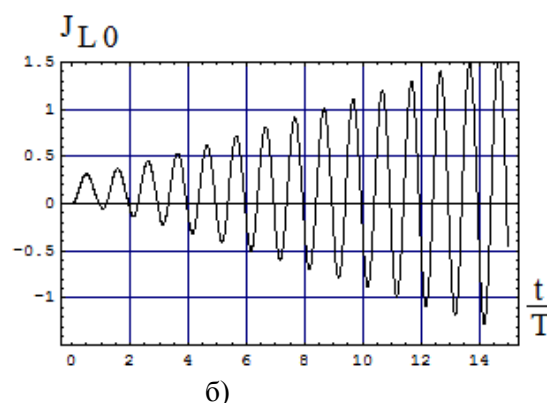
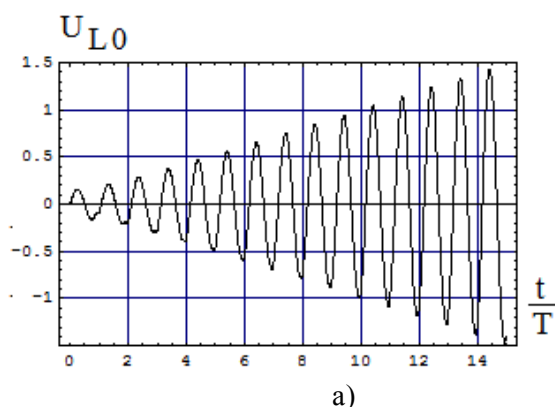


Рис. 7. Временные зависимости напряжений и токов, возбуждаемых импульсами длительностью  $t_j = 0,9$  в отсутствие активного сопротивления обмотки при строгом равенстве резонансной частоты и частоты следования возбуждающих импульсов тока –  $\eta = 1$ : а) напряжение; б) ток

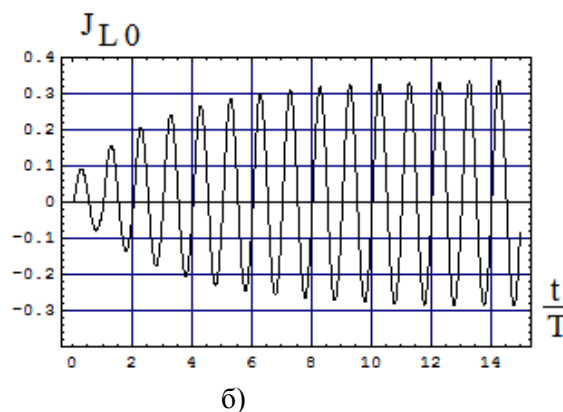
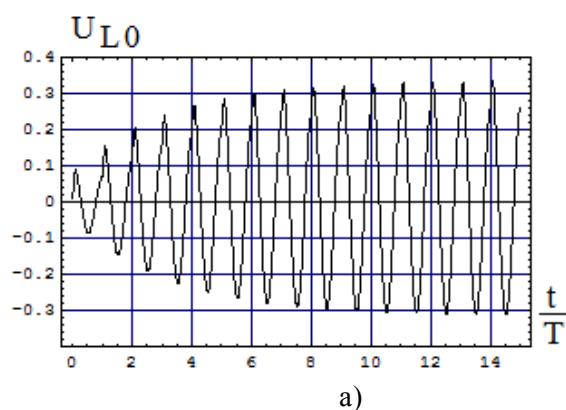


Рис. 8. Временные зависимости напряжений и токов, возбуждаемых импульсами длительностью –  $t_j = 0,1$  с учётом активного сопротивления обмотки (относительный декремент затухания –  $\delta_0 = 0,05$ ) при различных соотношениях резонансной частоты и частоты следования возбуждающих импульсов тока –  $\eta$ , а) напряжение, б) ток – в резонансе,  $\eta = 1$

### Основные результаты численных оценок влияния активного сопротивления проводов

Учёт активного сопротивления проводов обмотки индуктора позволяет оценить реальные возможности принятой схемы источника мощности при постоянной величине возбуждающего тока.

Активное сопротивление проводов обмотки индуктора существенным образом влияет на процесс возбуждения  $LC$  – контура.

Как следует из рис. 8,а-б, резонансные амплитуды тока в индукторе и напряжения на его входных клеммах возрастают во времени, но принимают конкретные ограниченные значения, определяемые собственно величиной активного сопротивления проводов обмотки индуктора.

Расчеты показывают, что при 10%-ном отклонении частоты следования импульсов от резонансной частоты  $LC$  – контура в сторону увеличения или уменьшения, амплитуды возбуждаемых сигналов падают более чем в 2 раза, но их временная форма остаётся квазипериодичной.

### Выводы

Обобщение всех результатов проведенных вычислений приводит к выводам:

1. Проведен теоретический анализ и численные оценки протекающих электромагнитных процессов в источнике мощности для возбуждения повторяющихся импульсов тока в системах индукционного нагрева.
2. Определено, что при возбуждении системы периодически повторяющимися импульсами тока и совпадении частоты их следования с частотой тока в  $LC$  – контуре имеет место явление «резонанса токов» и, как следствие, резкое возрастание тока в индукторе;
3. Показано, что активное сопротивление проводов обмотки индуктора существенно влияет на резонанс токов, их амплитуды будут определяться собственно величиной активного сопротивления, временная форма

возбуждаемых сигналов имеет квазипериодический характер.

### Литература

1. Яворский Б.М. Справочник по физике / Б.М. Яворский, А.А. Детлаф. – М. : Наука, 1968. – 940 с.
2. Сидоренко В.Д. Применение индукционного нагрева в машиностроении / Сидоренко В.Д. – Л. : Машиностроение, 1980. – 231 с.
3. Welcome to BETAG Innovation // Материали сайту – 2015. – Режим доступа: [www.beulentechnik.com](http://www.beulentechnik.com).
4. Лаборатория электромагнитных технологий // Материали сайта – 2015. – Режим доступа: <http://electromagnetic.comoj.com> па: <http://electromagnetic.comoj.com>.
5. Алиферов А.. Индукционный и электроконтактный нагрев металлов / А Алиферов., С. Лупи. – Новосибирск : Изд. НГТУ, 2013. – 354 с.
6. Benenson W., Harris J.W., Stöcker H., Lutz H. (Eds.), Hand book of Physics, Springer Science & Business Media, 2002.
7. Батыгин Ю. В. Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий / Батыгин Ю. В., Лавинский В. И., Хименко Л. Т. – Т. 1.; под ред. проф. Ю.В. Батыгина. – [2-е изд.] – Харьков: МОСТ-Торнадо, 2003. – 288 с.
8. Frank W Curtis, High Frequency Induction Heating, Lindsay Publications Inc, 1987.
9. Слухоцкий А.Е. Установки индукционного нагрева / Слухоцкий А.Е. – Л. : Энергоиздат, 1981. – 328 с.
10. Атабеков Г.И. Основы теории цепей / Атабеков Г.И. – Л. : Энергия, 2006. – 220 с.
11. Корн Т. Справочник по математике / Т. Корн, Г. Корн. – М. : Наука, 1973. – 834 с.

Рецензент: А.В. Батыгин, профессор, д.т.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 15 октября 2015 г.