

# Согласование высокочастотных генераторов с нагрузкой

**Энергоэффективность индукционных нагревательных устройств, применяемых для конструкционной и монтажной пайки, определяется выбором частоты нагрева, конструкцией индуктора и согласованием генератора с нагрузкой. Для сокращения времени экспериментального подбора компенсирующих элементов при согласовании ВЧ-генераторов с нагрузкой и обеспечения оптимальных режимов нагрева рационально провести моделирование нагревательной системы с помощью пакета Advanced Design System.**

**Владимир Ланин,**  
профессор

vlanin@bsuir.by

Высокочастотный электромагнитный нагрев, обладающий высокой скоростью бесконтактного и локального нагрева проводящих материалов в любой среде, применяют как для конструкционной, так и для монтажной пайки в электронике. Для формирования качественных паяных соединений необходим правильный выбор частоты нагрева, конструкции индуктора и оптимизация температурного профиля нагрева. Для ВЧ-нагрева применяются индукционные установки с выходной мощностью от 10 до 25 кВт, которые состоят из генератора 1 и рабочего стола, где размещается выносной блок конденсаторов, высокочастотный трансформатор 2 и индуктор 3 [1] (рис. 1).

В промышленности для ВЧ-нагрева применяют ламповые, тиристорные и транзисторные генераторы (рис. 2), работающие в диапазонах средних (66 кГц) и высоких частот (440 и 1760 кГц).

Пайка электронных устройств характеризуется невысокой удельной мощностью ВЧ-нагрева, малыми габаритами изделий и их чувствительностью к электромагнитным наводкам [2]. Поэтому для использования ВЧ-генераторов малой мощности (до 10 кВт) необходимо оптимизировать такие параметры ВЧ-нагрева, как эффективная мощность, выделяемая в зоне нагрева, и коэффициент полезного действия (КПД) нагрева.

Эффективная мощность ВЧ-нагрева в общем случае равна:

$$P_{эф} = (U_{эф}^2 \cos\varphi) / R_H \quad (1)$$

где  $U_{эф}$  — эффективное напряжение на индукторе;  $\cos\varphi$  — коэффициент мощности;  $\eta$  — КПД нагрева;  $R_H$  — электрическое сопротивление ВЧ-токам в зоне нагрева.

Активную мощность  $P$ , потребляемую индукционной установкой от сети, можно выразить через полезную мощность  $P_{пол}$  [3]:

$$P = P_{пол} / \eta_u \times \eta_{кб} \times \eta_l \times \eta_r \quad (2)$$

где  $\eta_u$ ,  $\eta_{кб}$ ,  $\eta_l$ ,  $\eta_r$  — КПД индуктора, конденсаторной батареи, линии и генератора соответственно.

Полный КПД индуктора:

$$\eta_u = \eta_3 \times \eta_T \quad (3)$$

где  $\eta_3$  — электрический КПД индуктора;  $\eta_T$  — термический КПД индуктора.

$$\eta_T = P_{пол} / (P_{пол} + \Delta P_T) \quad (4)$$

где  $\Delta P_T$  — тепловые потери в индукторе.

$$\eta_3 = \frac{(P_{пол} + \Delta P_T) / P_U}{(P_{пол} + \Delta P_T) / (P_{пол} + \Delta P_T + \Delta P_3)} \quad (5)$$

где  $\Delta P_3$  — электрические потери в индукторе.

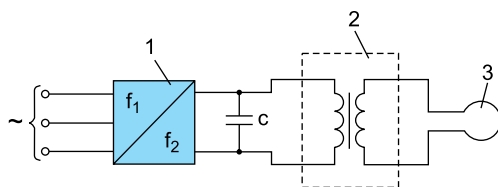


Рис. 1. Схема ВЧ индукционной установки



Рис. 2. Современные типы транзисторных ВЧ-генераторов мощностью до 10 кВт

Для круглых деталей диаметром  $d_2$  и индуктора диаметром  $d_1$  электрический КПД равен:

$$\eta_3 = \frac{1}{1 + \frac{d_1}{d_2} \sqrt{\frac{\rho_1}{\rho_2 \mu_2}}} \quad (6)$$

Практически предельное значение электрического КПД достигается при значениях  $d_2/\Delta_2 > 10$ , где  $\Delta_2$  — глубина проникновения тока в металл детали: для стали — 0,7–0,8; для меди — 0,5.

Наряду с выбором рациональных схем ВЧ-генераторов и конструкции нагревательных индукторов немаловажное значение имеет согласование ВЧ-генератора с технологической нагрузкой. Конструкция индуктора (рис. 3) зависит от геометрических параметров объекта нагрева, типа магнитопровода и частоты тока. Согласование генератора с нагрузкой сводится к обеспечению того, чтобы при заданном комплексном сопротивлении нагрузки режим работы генератора был оптимальным, то есть чтобы эквивалентное сопротивление нагрузочного контура равнялось оптимальному. Практически оно обеспечивается определенной связью между выходом генератора и индуктором.

Поскольку электрическое сопротивление индуктора имеет комплексный характер и включает реактивную и активную составляющие, то для согласования индуктора с ВЧ-генератором применяют схемы параллельной и последовательной компенсации (рис. 4). Для параллельной схемы компенсации, где  $Z_H$  — сопротивление, вносимое объектом нагрева,  $Z_{эл}$  — сопротивление индуктора и  $Z_K$  — сопротивление компенсирующего элемента [4], имеем эквивалентное сопротивление, равное:

$$Z_{экв} = (Z_{эл} Z_H Z_K) / (Z_{эл} Z_H + Z_{эл} Z_K + Z_H Z_K). \quad (7)$$

Для последовательной схемы компенсации имеем:

$$Z_{экв} = Z_K + (Z_{эл} Z_H) / (Z_{эл} + Z_H). \quad (8)$$

Для практических расчетов вводят следующие допущения: активное сопротивление  $Z_K$  пренебрежимо мало и  $Z_K = jX_K$ , активные электрические потери в компенсирующем

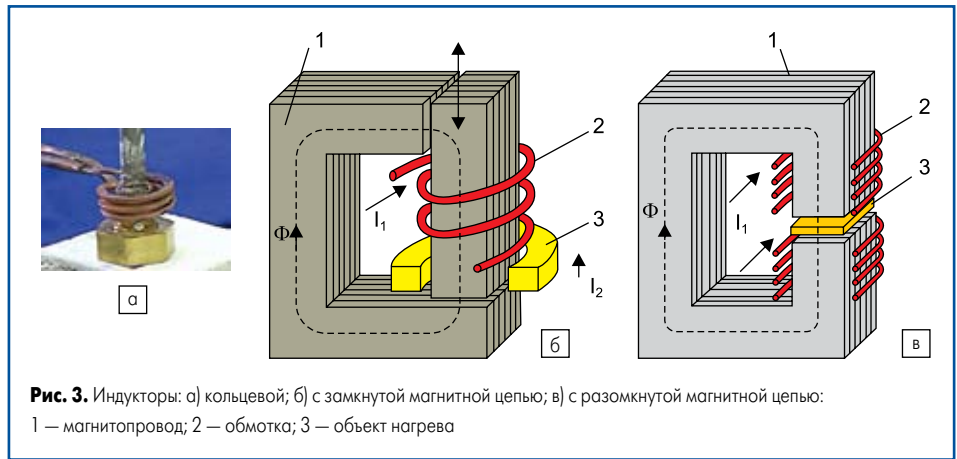


Рис. 3. Индукторы: а) кольцевой; б) с замкнутой магнитной цепью; в) с разомкнутой магнитной цепью: 1 — магнитопровод; 2 — обмотка; 3 — объект нагрева

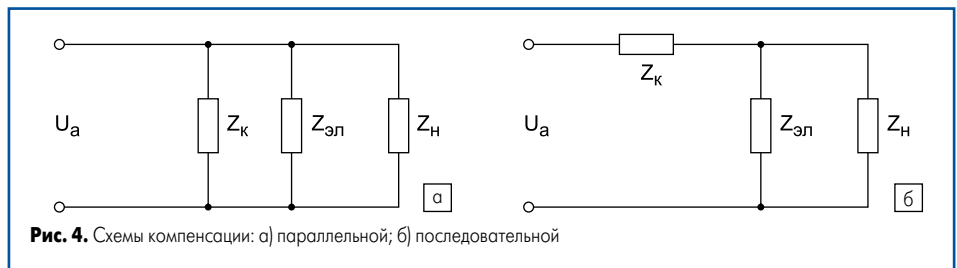


Рис. 4. Схемы компенсации: а) параллельной; б) последовательной

элементе и индукторе малы, а на частоте резонанса  $X_H = 0$ .

Для того чтобы генератор работал на активную нагрузку, следует выполнить условие минимума реактивной составляющей  $Z_{экв}$ , то есть при параллельной схеме компенсации  $X_K + X_{эл} = 0$ , а при последовательной —  $X_K X_{эл} + R_H^2 (X_{эл} + X_K) = 0$ .

Эквивалентные сопротивления нагрузки при этом будут равны:

- для параллельной схемы компенсации

$$R_{эб} = (R_H X_K^2) / (X_K^2 + (1 + X_K / X_{эл})^2 R_H^2), \quad (9)$$

- для последовательной

$$R_{эб} = (X_{эл}^2 R_H) / (X_{эл}^2 + R_H^2). \quad (10)$$

ВЧ-генераторы можно согласовывать с нагрузкой посредством изменения числа витков выходного генератора и подбором величины емкости согласующих конденсаторов, установленных в специальном конденсаторном блоке. Для ускорения эмпирического подбора емкости к некоторым типам генераторов прилага-

ют специальные номограммы, связывающие рабочую частоту и величину емкости конденсатора. Однако при любой смене индуктора нужно снова проводить процесс согласования с нагрузкой.

Для исключения ошибок в согласовании ВЧ-генераторов и обеспечения оптимальных режимов ВЧ-нагрева рационально применить моделирование ВЧ нагревательной системы с помощью пакета Advanced Design System (ADS) фирмы Agilent Technologies [5]. Система ADS содержит функции, которые необходимы для разработки и проектирования аналоговых и цифровых радиотехнических устройств, всего сигнального тракта устройств, проводной или радиосвязи (включая связанные системы и цифровую обработку модулирующих сигналов), проектирование печатных плат, разработку монолитных интегральных схем и пространственных электромагнитных структур, а также разводку печатных плат. ADS является средой, которая позволяет определять или импортировать высокочастотные, аналоговые и цифровые параметры, а также ключевые параметры взаимодействия моделей.

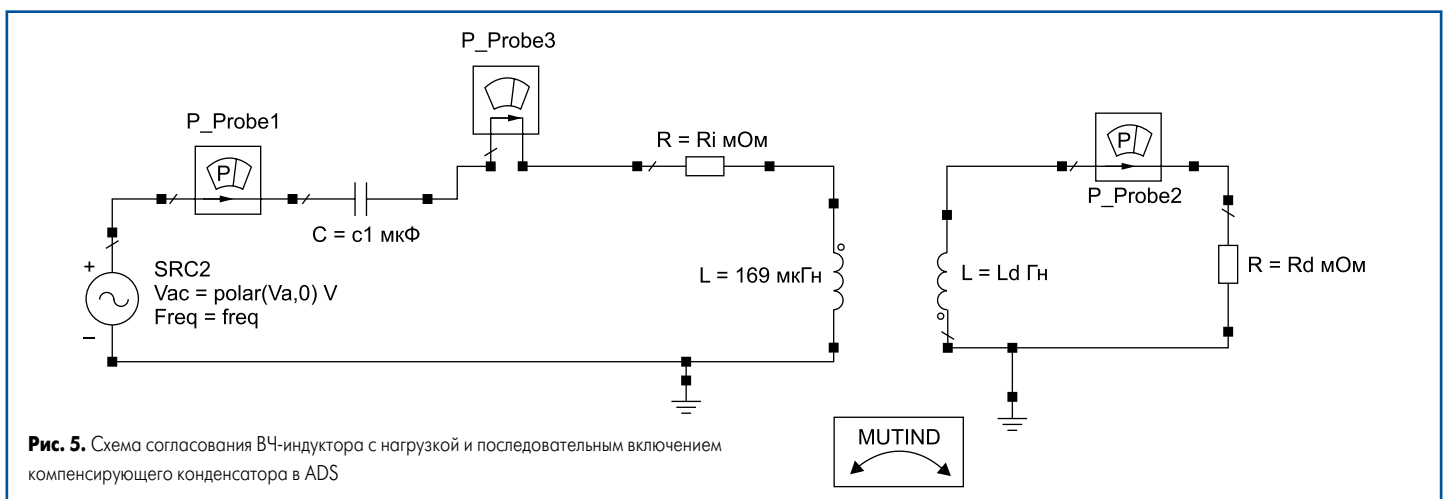


Рис. 5. Схема согласования ВЧ-индуктора с нагрузкой и последовательным включением компенсирующего конденсатора в ADS

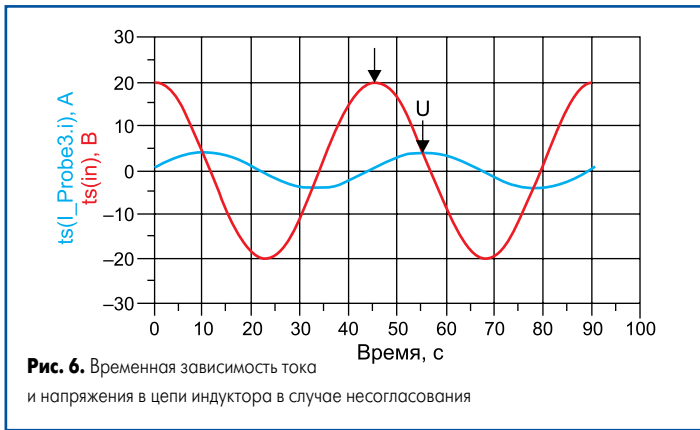


Рис. 6. Временная зависимость тока и напряжения в цепи индуктора в случае несогласования

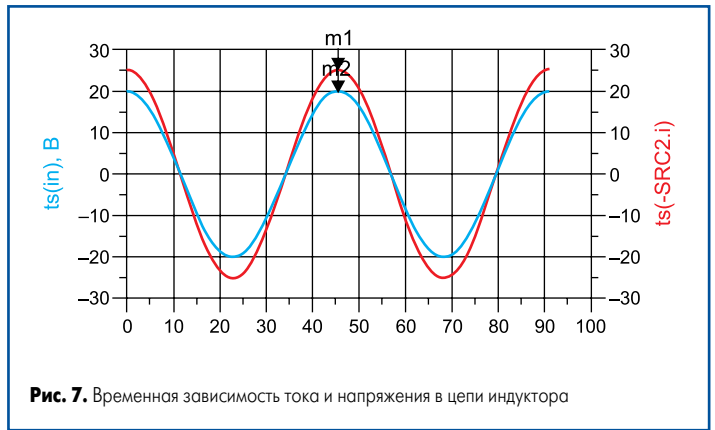


Рис. 7. Временная зависимость тока и напряжения в цепи индуктора

Схема согласования ВЧ-индуктора с последовательным включением компенсирующего конденсатора и магнитной связью с нагрузкой в Advanced Design System приведена на рис. 5.

Определив с помощью измерителя иммитанса E7-20 параметры индуктора — индуктивность  $L$ , активное  $R_i$  и реактивное сопротивление на рабочей частоте, вводим эти данные в программу. В результате расчета получаем значения временной зависимости тока и напряжения в индукторе и числовые данные о КПД нагрева и мощности, выделяемой при нагреве в детали и в индукторе. При неполной компенсации реактивной составляющей сопротивления индуктора наблюдаются сдвинутые во времени максимумы тока и напряжения в цепи индуктора, и КПД нагрева медных сплавов в данном случае не превышает 32–36% (рис. 6).

Изменяя величину компенсирующего конденсатора, можно добиться того, чтобы на ра-

бочей частоте ВЧ-нагрева на временной зависимости тока и напряжения наблюдалась синфазность их максимумов. В этом случае КПД нагрева достигает 40–45% (рис. 7). Дальнейшее увеличение КПД нагрева до 60% происходит при увеличении магнитной связи индуктора с деталью (нагрев ферромагнитных материалов, применение магнитопроводов), а также при снижении собственного активного сопротивления индуктора (увеличение полезного сечения для вихревых токов, нанесение гальванического серебряного покрытия и др.).

С помощью ADS можно получить частотную зависимость для тока в цепи индуктора (рис. 8), а также построить номограмму выбора величины компенсирующих конденсаторов в зависимости от индуктивности индуктора (рис. 9).

Таким образом, используя измеренные параметры нагревательного индуктора на вы-

бранной частоте нагрева и физические параметры объекта нагрева, при моделировании индукционной нагревательной системы в пакете Advanced Design System можно оперативно согласовать ВЧ-генератор с нагрузкой и обеспечить при этом высокий КПД нагрева.

### Литература

1. Induction Heating. Industrial Applications / Ed. by S. Lupi. Paris: U. I.E., 1992.
2. Ланин В. Л. Высокочастотная конструкционная и монтажная пайка // Технологии в электронной промышленности. 2009. № 5.
3. Простяков А. А. Индукционные нагревательные установки. М.: Энергия, 1970.
4. Донской А. В., Келлер О. К., Кратыш Г. С. Ультразвуковые электротехнологические установки. Л.: Энергоиздат, 1982.
5. [www.agilent.com](http://www.agilent.com)

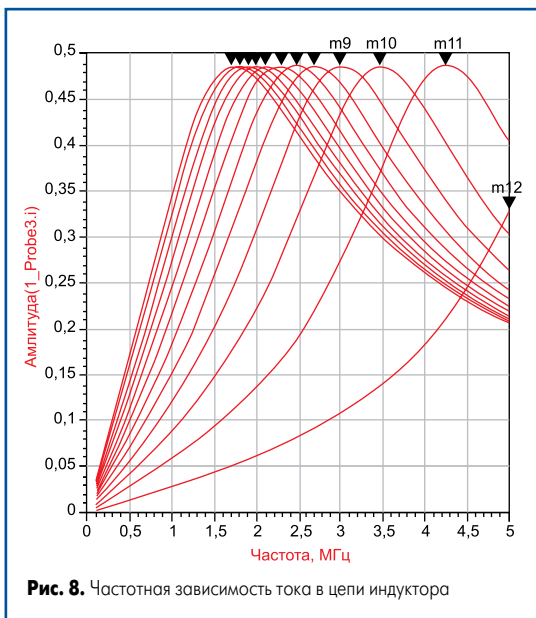


Рис. 8. Частотная зависимость тока в цепи индуктора

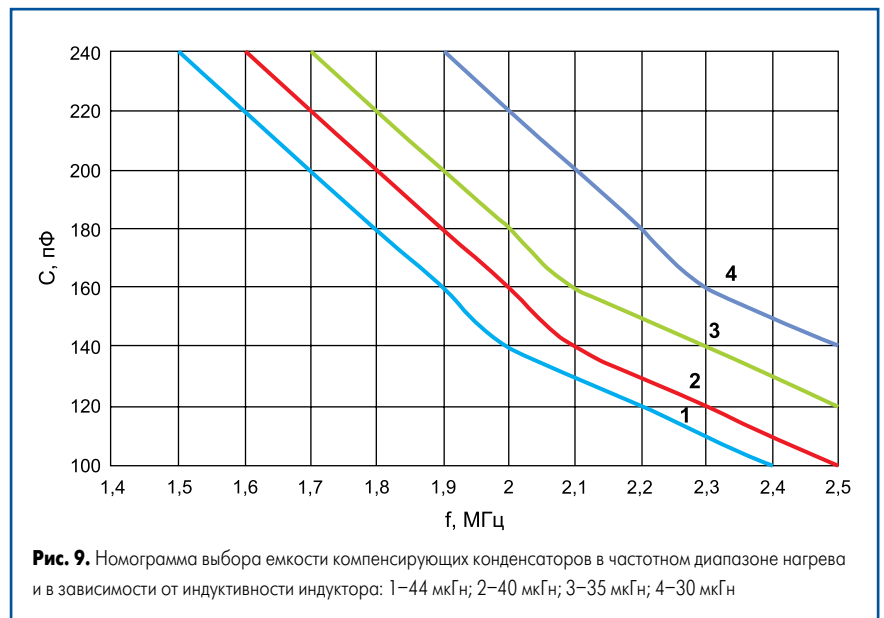


Рис. 9. Номограмма выбора емкости компенсирующих конденсаторов в частотном диапазоне нагрева и в зависимости от индуктивности индуктора: 1–44 мкГн; 2–40 мкГн; 3–35 мкГн; 4–30 мкГн