

# Согласование с нагрузкой

## В современных системах индукционного нагрева

**Индукционная термообработка является сложным процессом, на который влияет большое количество факторов. Основными компонентами индукционной нагревательной системы являются индуктор, источник питания, станция согласования и, собственно, нагреваемая заготовка. Наиболее важным аспектом процесса индукционной термообработки, который чаще всего рассматривается на начальной стадии проектирования, является способность сообщить заготовке максимально возможную мощность от заданного источника с минимальными потерями.**

**Рэй Л. Кук  
Дон Л. Лавлесс  
доктор Валерий И. Руднев  
(Ray L. Cook,  
Don L. Loveless,  
dr. Valery I. Rudnev)  
Inductoheat, Madison  
Heights, MI 48071**

**Перевод  
Юрий Болотовский,  
к. т. н.**

eltech@ufacom.ru

**Георгий Таназлы,  
к. т. н.**

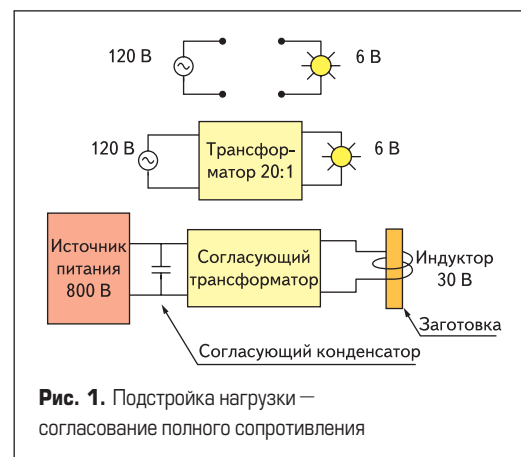
g\_thanazly@mail.ru

**А**нализ современных полупроводниковых источников питания приведен в [1]. Обстоятельства не всегда позволяют осуществить оптимальное проектирование индукционной нагревательной системы, где источник питания, включая параметры индуктора, идеально подходит для проведения технологического процесса. Очень часто индуктор проектируется для реализации требуемого режима индукционного нагрева безотносительно к особенностям того источника питания, который будет использоваться. В этом случае необходимо переходное устройство для согласования выходных характеристик источника питания с характеристиками системы «индуктор–заготовка». Когда такое согласование не обеспечено, источник питания не сможет реализовать свою паспортную мощность, если для индуктора требуются большие напряжение или ток по сравнению с теми значениями, которые можно получить от источника. Существует значительное количество факторов, любой из которых может препятствовать достижению требуемых параметров индукционного нагрева. Трансформаторы с переменным коэффициентом трансформации, конденсаторы, а иногда и дроссели включаются между выходом источника питания и индуктором. Определение параметров этих элементов чаще всего определяется термином «согласование с нагрузкой». В статье в краткой форме приводятся теоретические выкладки и опыт, накопленный в компании Inductoheat Inc. во время разработки полупроводниковых источников питания и процессов индукционного нагрева.

Четыре шага к пониманию согласования нагрузки с источником питания.

### Шаг 1

Наиболее распространенный пример согласования источника питания с нагрузкой может быть пояснен на примере обычной осветительной цепи для случая, когда лампа с номинальным напряжением в 6 В должна быть запитана от 120-вольтовой цепи (рис. 1). Возникает необходимость определенного типа согласующего устройства, предотвращающего выход из строя лампочки от напряжения 120 В. Это обычно достигается при включении трансформатора между лампочкой и сетью.



**Рис. 1.** Подстройка нагрузки — согласование полного сопротивления

Индукционный нагреватель содержит не только резистивный элемент, но и определенную индуктивность. Как элемент электрической цепи, любой индуктор может быть представлен как комбинация активного сопротивления и реактивного сопротивления (индуктивности). И активное, и реактивное сопротивление индуктора являются нелинейной функцией нескольких параметров, таких как геометрия индуктора, свойства материалов и частоты. Электрическое сопротивление и магнитная проницаемость металла являются нелинейными функциями температуры. Следовательно, в ферромагнитных материалах изменение электрического сопротивления и магнитной проницаемости происходит во время цикла нагрева. Кроме того, современные процессы обработки металлов требуют нагрева заготовок различных размеров в одном и том же индукторе. Значит, комбинация различных типов деталей и изменения свойств материала при изменении активного и реактивного сопротивления индуктора воздействует на настройку и характеристики источника питания.

Вообще говоря, изменение активного и реактивного сопротивлений индуктора приводит к изменению сдвига фаз между напряжением и током индуктора. Такое изменение может характеризоваться коэффициентом мощности индуктора  $\cos \phi$ , где  $\phi$  — угол, характеризующий сдвиг фаз между током и напряжением. Коэффициент мощности для разных типов индукторов различным образом определяется вышеперечисленными факторами. В то же время, для раз-

личных частот, коэффициент мощности может существенно отличаться (от  $\cos \varphi = 0,05$  до  $\cos \varphi = 0,6$ ). Наряду с коэффициентом мощности, среди специалистов, для характеристик нагрузочного контура широко используется коэффициент добротности  $Q$ . Он определяется как отношение индуктивного сопротивления к активному сопротивлению индуктора.

Кроме этого, процесс нагрева обычно требует применения частоты, которая отличается от частоты питающей сети. В зависимости от условий нагрева обычно применяются частоты из диапазона от 200 Гц до 400 кГц. Это требует применения устройств, изменяющих частоту (полупроводниковых преобразователей частоты). Так как для успешной термообработки детали требуются достаточно высокие значения токов, необходимо применение мощного источника питания, обеспечивающего данную величину тока или применение простых резонансных цепей для минимизации токов или напряжений, которые обеспечивает источник питания [2, 3]. Проиллюстрируем это утверждение на простом примере.

**Пример**

Дан индуктор, который требует для нормальной работы мощность 100 кВт при напряжении 40 В и токе 10 000 А на частоте 10 кГц, и источник питания, который обеспечивает мощность 100 кВт, напряжение 440 В и ток 350 А. Совместимы ли два эти устройства?

При использовании разделительного трансформатора можно выбрать коэффициент трансформации 440/40 или 11:1 для согласования работы индуктора и источника. Это приведет к тому, что потребляемый от источника ток будет равен 10 000/11 или 909 А, что превосходит токовые возможности источника питания.

При подключении специального конденсатора определенной емкости к индуктору возможно снижение тока, потребляемого от источника при обеспечении успешного нагрева. Подключение емкости достаточной величины приводит к изменению коэффициента мощности ( $\cos \varphi = 1$ ), что позволяет снизить потребляемый от источника ток до величины, равной 100 кВт/440 В или 227 А, что вполне укладывается в ограничение по току для рассматриваемого типа источника питания. Это не только снижает требования к источнику питания, но и позволяет уменьшить сечение присоединительных кабелей, контакторов и трансформаторов за счет повышения коэффициента мощности.

Как показано в [1], существуют два основных типа резонансных преобразователей час-

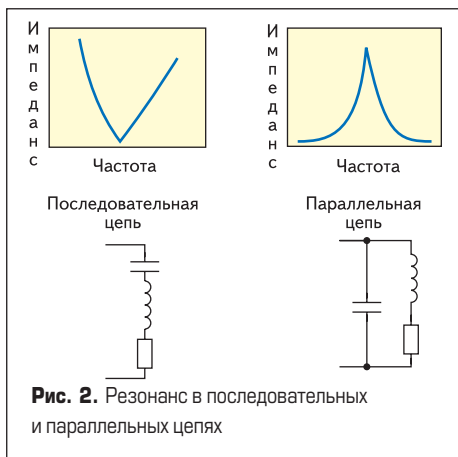


Рис. 2. Резонанс в последовательных и параллельных цепях

тоты, использующих параллельный и последовательный резонансный контур. На рис. 2 показаны характеристики последовательной и параллельной резонансных цепей. В параллельной цепи, если конденсатор отсутствует, то заданное напряжение, прикладываемое к цепи при фиксированной частоте, обеспечит выделение определенной мощности, зависящей от полного сопротивления цепи. При включении в цепь конденсатора, емкость которого обеспечивает околорезонансные режимы, полное сопротивление цепи существенно возрастает, а ток, потребляемый от источника питания, существенно падает. Напряжение цепи требует не только достижения той же мощности, что и при рассмотрении нагрузки без конденсатора, но и большего тока, протекающего через конденсатор от источника питания.

В параллельно подключенной нагрузочной цепи в контуре имеет место увеличение тока в  $Q$  раз по отношению к току источника питания (рис. 3). Аналогичный случай справедлив для последовательного контура. При расчете изменения полного сопротивления цепи ее ток может быть больше при заданном входном напряжении, когда цепь работает в околорезонансном режиме, в то время как полное сопротивление стремится к нулю. Ток нагрузки, требуемый для получения заданной мощности, является одним и тем же для заданной нагрузочной цепи, безотносительно к тому, является ли эта цепь последовательной или параллельной. Однако из-за того, что результирующее сопротивление падает, а требуемый ток является фиксированным, прикладываемое напряжение приблизительно в  $Q$  раз ниже, чем напряжение, прикладываемое непосредственно к катушке. Следовательно, происходит увеличение тока в  $Q$  раз в параллельном контуре и увеличение напряжения в  $Q$  раз в последовательном контуре (рис. 3). Это следует обяза-

тельно учитывать при выборе типа нагрузочной цепи, для того чтобы правильно оценивать явления, вызывающие изменение режимов работы источника питания и элементов нагревательного поста.

**Шаг 2**

При рассмотрении зависимости выходной мощности для заданной цепи нагрузки от рабочей частоты контура (рис. 4), в случае постепенного подхода к резонансной частоте из области низких частот происходит увеличение выходной мощности. На частотах выше резонансной будет наблюдаться монотонное уменьшение выходной мощности. Эта характеристика часто используется для настройки требуемого режима источника питания. Целью подстройки нагрузочного поста является получение требуемой мощности, выделяемой в нагреваемой заготовке без превышения какого-либо из паспортных параметров источника питания [1, 4].

Полезный способ настройки нагрузочного поста сводится к тому, что вначале определяются выходные параметры источника питания, в соответствии с которыми осуществляется настройка нагрузочного поста. Затем проводится оценка требуемого напряжения на индукторе для получения желаемой выходной мощности. Это может быть сделано с помощью заранее известных данных или общих эмпирических правил экстраполяции. После этого выбирается коэффициент трансформации развязывающего трансформатора для получения согласования по напряжению. Следующий шаг заключается в определении параметров индуктора, при этом используется анализатор частоты нагрузки или генератор сигналов для определения резонансной частоты нагрузочного контура [4]. На рис. 5 показан анализатор частоты нагрузки, который является полупроводниковым переносным прибором, он быстро определяет резонансную частоту нагрузочного контура без нагрева рабочего тела. Такой анализатор исключает существенные потери времени и предотвращает отбраковку заготовок при настройке. Анализатор исключает эти недостатки, при этом легко и точно определяется резонансная частота любой установки для индукционного нагрева или индукционной обработки.

После определения резонансной частоты необходимо добавить или убавить емкость для согласования частоты нагрузочного контура с номинальной частотой источника питания.

Это может быть выгодно при изменении параметров элементов нагрузочного поста.

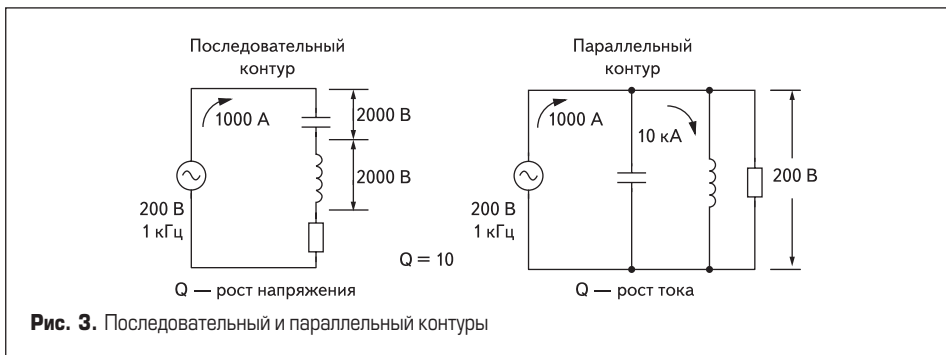


Рис. 3. Последовательный и параллельный контуры

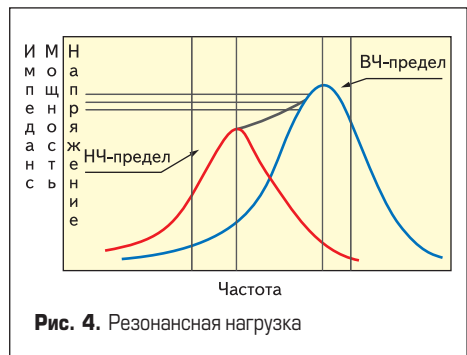


Рис. 4. Резонансная нагрузка



Рис. 5. Анализатор частоты нагрузки

Индуктор может варьироваться по размерам и форме в зависимости от характеристик нагреваемой заготовки. Эффект изменения при использовании простого цилиндрического индуктора и заготовки демонстрируется на рис. 6. Значение добротности цепи непосредственно определяется в зависимости от соотношения внутреннего диаметра индуктора и внешнего диаметра заготовки и является причиной необходимости увеличения реактивной мощности для сохранения индуктивного косинуса цепи. Чем больше зазор между заготовкой и индуктором, тем большее значение величины компенсирующей емкости требуется.

Параметры согласующего трансформатора нагрузочного поста также могут изменяться путем подключения различных отпаек для изменения коэффициента трансформации. Это приводит к существенным изменениям индуктивности цепи, отнесенной к первичной обмотке и, как следствие, емкости конденсаторов, требуемой для согласования.

Величина емкости, подключенной к нагрузке, тоже может быть изменена. Увеличение этой емкости приводит к снижению резонансной частоты, а уменьшение — к повышению. Иногда случаются ошибки при считывании фактической емкости конденсатора из-за того, что на бирке обозначены мощность конденсатора в КВАРах и емкость в микрофарадах. Следующая формула позволяет вычислить мощность конденсатора в КВАРах:

$$kVAR = 2\pi F C V^2 / 1000,$$

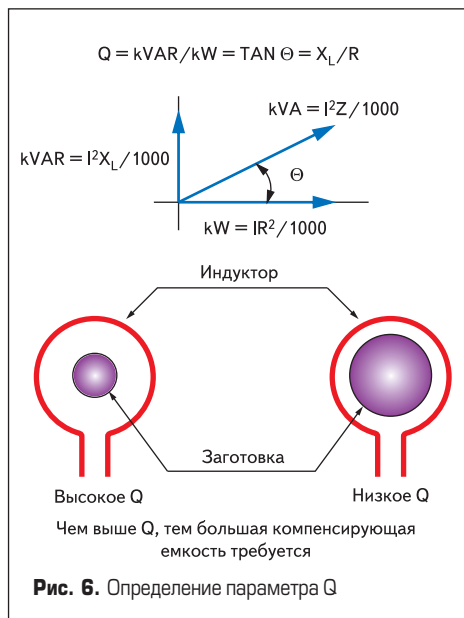


Рис. 6. Определение параметра Q

которая, очевидно, является функцией частоты F (в герцах), емкости C (в микрофарадах) и напряжения V. Для данного конденсатора величина КВАР приводится на бирке как частота и напряжение. Если конденсатор используется на других напряжениях или частотах, фактически требуемая для согласования емкость должна подбираться в соответствии с вышеприведенной формулой таким образом, чтобы величина КВАР сохранялась.

Какое реальное преимущество дает параметр КВАР? Он может реально облегчить расчеты, когда между индуктором и емкостью стоит трансформатор. Как показано на рис. 7, где добротность нагрузки  $Q = 8$ , требуемое значение нагрузочного или компенсирующего конденсатора приблизительно равно величине добротности Q, помноженной на мощность преобразователя в киловаттах. При мощности 150 кВт потребуются устанавливать компенсирующие конденсаторы мощностью 1200 КВАР при условии их работы на номинальной частоте и напряжении. Эта величина емкости в КВАРах должна сохраняться безотносительно к тому, каким образом емкость подключается к нагрузочному контуру. Если КВАРы были подобраны, то величина индуктивности индуктора должна быть рассчитана заново в зависимости от способа подключения трансформатора, а после этого повторно должна быть определена и величина емкости.

Одно из распространенных заблуждений сводится к тому, что большинство пользователей полагают, что величина КВАРов конденсатора является постоянной. Это неверно, так как это значение меняется при изменении рабочей частоты и/или напряжения. Поэтому необходимо определять КВАРы на рабочем напряжении и выбирать конденсаторы таким образом, чтобы они обеспечивали требуемую суммарную величину КВАР на желаемом напряжении и рабочей частоте. Например, исходя из приведенного выше примера, если цепь требует подключения 1200 КВАР при напряжении 600 В и 10 кГц, то наиболее подходящий стандартный конденсатор, который можно будет использовать, будет на 2133 КВАРа, 800 В и 10 кГц.

Производители в течение многих лет выпускали конденсаторы на стандартные напряжения 220, 400, 440 и 800 В, для того чтобы уменьшить номенклатуру выпускаемых конденсаторов и согласовать их рабочее напряжение с выходными напряжениями машинных генераторов.

Другой компонент, который может изменяться в процессе согласования, — автотрансформатор. На практике изменение отпаек

трансформатора будет влиять на выходное напряжение и не влиять на рабочую частоту. Это утверждение справедливо, потому что в некоторых случаях при использовании полупроводниковых источников питания индуктивность рассеяния автотрансформатора может быть значительной. Необходимо проявлять осторожность при выборе расположения автотрансформатора, так как он может существенно увеличить требуемое количество киловольт-ампер трансформатора.

Шаг 3

Исторически для машинных генераторов настройка сводилась к попыткам добавления необходимого количества конденсаторов, для того чтобы получить коэффициент мощности  $\cos \phi = 1$  или нулевой сдвиг фаз по приборам на панели управления. При использовании полупроводниковых источников питания зачастую работа осуществляется на мощности, меньшей, чем номинальная, и любая индуктивность, добавленная в соединительные провода, приводит к изменению коэффициента мощности. Часто реактивные элементы, расположенные в источнике питания, должны рассматриваться как часть настраиваемой цепи. При детализации рассмотрения необходимо отметить, что любой тип источника питания имеет допуски на параметры, изменение которых нежелательно, так как может привести к ограничению мощности, передаваемой в заготовку. Перед покупкой источника питания рекомендуется проконсультироваться с производителем, имеются ли в наличии дополнительные конденсаторы. Многие пользователи, приобретающие источник питания мощностью 150 кВт, смогли получить от него максимальную мощность нагрузки 90 кВт. На рис. 4 показана типичная регулировочная кривая для преобразователя с регулировкой частоты, работающего на параллельный контур. Этот тип источника питания очень часто запускается с низкой частоты, так называемого низкочастотного ограничения, и начинает изменять частоту до тех пор, пока не будет достигнут требуемый уровень мощности или ее предельно возможное значение. Как правило, существуют ограничение по высокой частоте, фазе или минимальному значению полного сопротивления, ограничение выходного напряжения, ограничение выходного тока, ограничение максимальной мощности и т. д.

Одним из осложнений, которое может возникнуть в результате рассогласования нагрузки, является увеличение частоты выше резонансной. Это приводит к осложнению регулирования нагрузочного контура. Это нормально

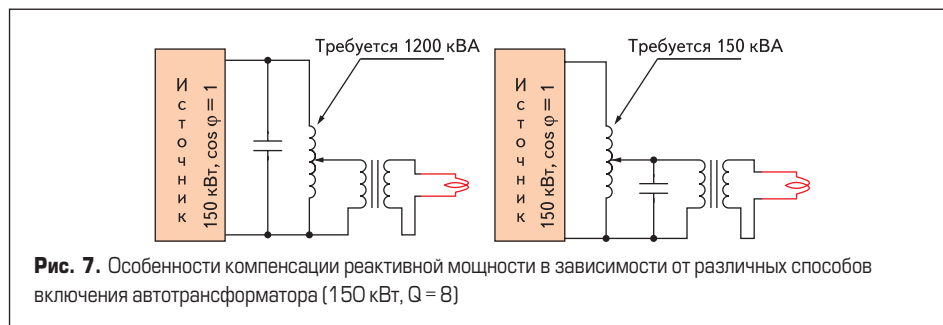


Рис. 7. Особенности компенсации реактивной мощности в зависимости от различных способов включения автотрансформатора (150 кВт, Q = 8)

в режиме, когда увеличение частоты приводит к увеличению выходной мощности. Однако возникают ситуации, когда мощность может уменьшаться при увеличении частоты при частотах выше резонансной. При этом повышение частоты будет осуществляться до тех пор, пока не будет достигнуто ее предельное значение. Эта ситуация классифицируется как «перескакивание горба». Средством против этого в основном является уменьшение величины компенсирующего конденсатора или увеличение индуктивности, приводящее к увеличению резонансной частоты. Для источников питания, в которых применяется емкость для последовательной компенсации, «перескакивание горба» происходит в случае, когда величина последовательной емкости очень мала для паспортной мощности источника питания. Регулируя величину компенсирующего конденсатора и число витков трансформатора, возможно сместить кривую, приведенную на рис. 4, влево или вправо, для того чтобы исключить режимы с ограничением параметров источника питания. Выделяемая в нагрузке мощность показана на кривой, и, если кривая смещена слишком далеко влево, перегрузку по мощности можно получить без управления регулятором мощности. Многие полупроводниковые преобразователи не запускаются на нулевой мощности, даже если регулятор мощности установлен на нулевое значение.

Ведомые током источники питания работают на параллельный контур, осуществляя подстройку на резонансную частоту нагрузки за счет изменения фазы. К сожалению, проблема согласования продолжает существовать. Во многих ведомых током установках максимально допустимый ток только незначитель-

но выше, чем получаемый для этой установки при коэффициенте мощности, соответствующем полному выходному напряжению. Это означает, что если полное сопротивление нагрузочного контура не подобрано точно, полный ток и полное напряжение источника питания не обеспечат на нагрузке полную мощность. Эта ситуация иногда требует установки специальной настроечной шины для подгонки результирующего сопротивления до нужной величины. Если ток в процентах к своей максимальной величине больше, чем напряжение по отношению к максимальной величине, то требуется увеличение индуктивности цепи. В противном случае требуется уменьшение индуктивности. Другое решение обеспечивается, если ведомый ток инвертора работает на частоте выше резонансной частоты нагрузочной цепи. Это условие снижает полное сопротивление нагрузки для лучшего согласования с инвертором.

#### Шаг заключительный

Последняя неприятность, которая может проявиться при согласовании инвертора с нагрузкой, связана с согласованием токоподводов от источника питания к нагрузке или нагревательному посту и токоподводов от конденсаторов нагревательного поста или выходного трансформатора до индуктора. Их большая индуктивность может вызвать значительные проблемы, определяемые чрезмерным падением напряжения на токоподводах, что приводит к снижению напряжения, прикладываемого к индуктору. В результате это может привести к значительному снижению выделяемой в заготовках мощности и нарушению режима нагрева. Особенно критичны значения этой ин-

Данное приложение предлагается переводчиками. В нем дается таблица, в которой даны оценочные характеристики добротности  $Q$  и  $\cos \varphi$  для типичных технологических процессов индукционного нагрева. Данная таблица может быть полезна при согласовании различных типов источников питания систем индукционного нагрева с нагрузкой.

Напомним очевидную связь между добротностью  $Q$  и  $\cos \varphi$  нагрузочного контура:

$$\cos \varphi = 1/\sqrt{1+Q^2}$$

$$Q = \sqrt{(1/\cos^2 \varphi)-1}$$

Процесс	$\cos \varphi$	Добротность $Q$
Закалка	0,3–0,4	3,2–2,3
Ковка	0,1–0,2	9,9–4,8
Отжиг и нормализация	0,15–0,25	6,6–3,9
Пайка и сварка	0,1–0,2	9,9–4,8
Расплавление	0,05–0,1	19,9–9,9

дуктивности при выделении больших мощностей на токоподводах между компенсирующим конденсатором и индуктором и на высоких частотах и больших токах. Хорошим способом уменьшения этих потерь является минимизация индуктивности токоподводов, что снижает стоимость и размеры установки.

#### Литература

1. Loveless D. L., Cook R. L., Rudnev V. I. Power Supplies for Induction Heat Treating. Industrial Heating, June 1995.
2. Inductoheat Bulletin: General Presentation, 1992.
3. Inductoheat Bulletin: STATIPOWER, 1991.
4. Inductoheat Bulletin: Load Frequency Analyzer, 1991.