

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ ПИТАНИЯ УСТАНОВОК ИНДУКЦИОННОЙ ЗАКАЛКИ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ПРИ ДВУХЧАСТОТНОМ НАГРЕВЕ

Дзлиев С. В., д.т.н., профессор
Санкт-Петербургского Государственного Электротехнического Университета

Россия, 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5

ABSTRACT

The various principles of generation and possible structures of construction of power supplies for dual-frequency induction hardening of gear wheels are considered.

With use of simulation the filters ensuring effective transfer of power to inductor on working frequencies are investigated. The temporary analysis of operation modes of inverters in dual-frequency converters is executed and the switching processes of power transistors are investigated.

The recommendations for a choice of optimal structure of the dual-frequency power supply of induction heater for superficial hardening of gear wheels are given.

ВВЕДЕНИЕ

Зубчатые колеса являются ответственными деталями, от качества которых зависит срок службы и надежность машин и механизмов.

Высокоинтенсивный нагрев под закалку зубчатых колес на двух резко отличающихся частотах, при правильно подобранном режиме, позволяет получать равномерный по периметру закаленный поверхностный слой, как по глубине, так и по твердости. Это существенно повышает качество зубчатых колес и увеличивает срок их службы.

До недавнего времени двухчастотный нагрев под закалку реализовывался путем последовательного нагрева зубчатого колеса в двух индукторах, питающихся от генераторов разных частот [1]. Появление новых, высоко автоматизированных источников питания, позволило существенно усовершенствовать режимы закалки, которые в настоящее время характеризуются высокими удельными мощностями (2 – 20 кВт/см²) и временами нагрева порядка 50 – 300 мс [2, 3]. При таких малых временах нагрева механическое перемещение детали из одного индуктора в другой приводит к недопустимой паузе в нагреве и резкому ухудшению температурного поля в зубчатом колесе. Поэтому актуальной задачей является создание систем питания, которые обеспечат нагрев зубчатого колеса в одном индукторе сразу на двух сильно отличающихся частотах.

В работе рассмотрены различные принципы генерации двух частот и возможные структуры построения источника питания и цепей согласования индуктора на двух рабочих частотах.

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ДВУХЧАСТОТНЫХ СИСТЕМ ПИТАНИЯ

Индуктор, как нагрузка источника питания, имеет следующие особенности:

- описывается последовательной LR- схемой замещения с изменяющимися в процессе нагрева параметрами;
- имеет разные параметры схемы замещения на высокой и низкой частоте;

- для эффективной передачи активной мощности от источника в индуктор реактивная мощность индуктора компенсируется конденсатором, в результате чего образуется резонансный контур, который и является нагрузкой источника питания.

- при питании одного индуктора напряжением, имеющим две частотные составляющие, компенсация реактивной мощности индуктора должна быть произведена на каждой частоте. Таким образом, нагрузкой двухчастотного источника питания являются два резонансных контура, включающих индуктор, как общий элемент, и фильтры, развязывающие цепи питания высокой и низкой частоты.

Двухчастотные источники питания установок индукционной закалки могут быть построены по следующим принципам:

- сложение мощностей двух автономных преобразователей, работающих на разных частотах;
- генерация одним преобразователем двухчастотного выходного напряжения за счет управления инвертором или модуляции напряжения питания инвертора;
- поочередная генерация двух разных частот одним преобразователем.

Принцип сложения мощностей может быть реализован путем сложения напряжений при последовательном включении источников или путем сложения токов при параллельном подключении источников к индуктору.

Генерация двухчастотного напряжения может производиться за счет сложения напряжений близких частот (биения), одна из которых – частота работы инвертора, а вторая – частота периодически меняющегося управляющего воздействия, например модулированное напряжение питания инвертора.

Поочередный генерация двух разных частот, это практически импульсный режим работы преобразователя при изменении частоты работы инвертора на каждом импульсе.

Ниже более подробно рассмотрены возможные пути реализации этих принципов.

СЛОЖЕНИЕ МОЩНОСТИ ДВУХ АВТОНОМНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ, РАБОТАЮЩИХ НА РАЗНЫХ ЧАСТОТАХ

На рис. 1 а) и б) приведены структурные схемы двухчастотных источников питания, использующих принципы сложения напряжений и токов соответственно. На схемах приняты следующие обозначения: ПНЧ - преобразователь низкой частоты, ПВЧ - преобразователь высокой частоты, И – индуктор, ФНЧ - фильтр низких частот, ФВЧ - фильтр высоких частот.

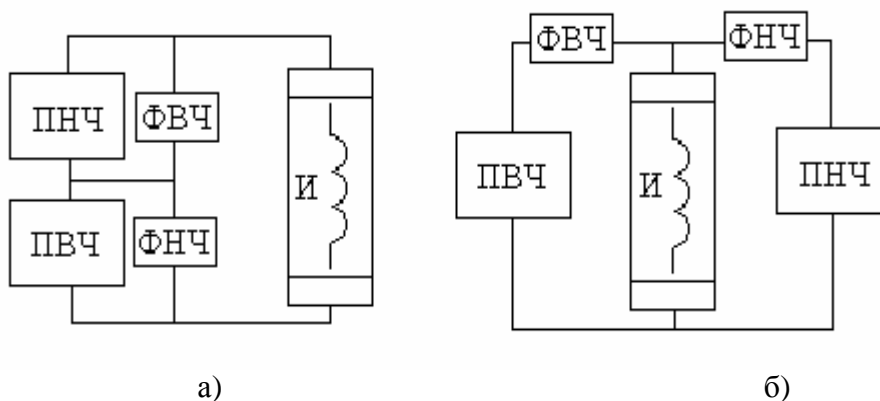


Рис. 1.

На рис. 2. показаны схемы параллельного сложения токов высокочастотного преобразователя на базе инвертора напряжения ПВЧ ИН и низкочастотного

преобразователя на базе инвертора тока ПНЧ ИТ (рис.2а) или инвертора напряжения ПНЧ ИН (рис. 2б).

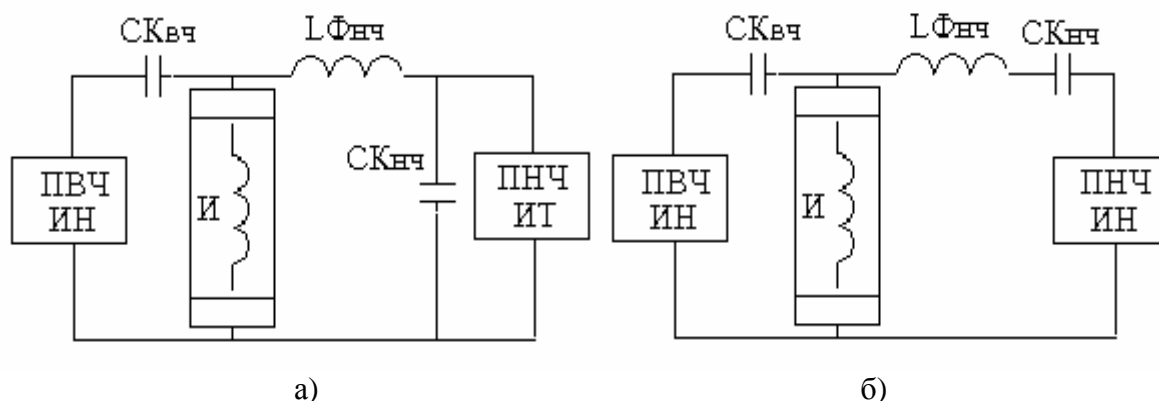


Рис. 2.

На рис. 3 показаны схемы сложения напряжений низкочастотного преобразователя на базе инвертора тока ПНЧ ИТ и высокочастотного преобразователя на базе инвертора напряжения ПВЧ ИН (рис.3а) или инвертора тока ПВЧ ИТ (рис. 3б).

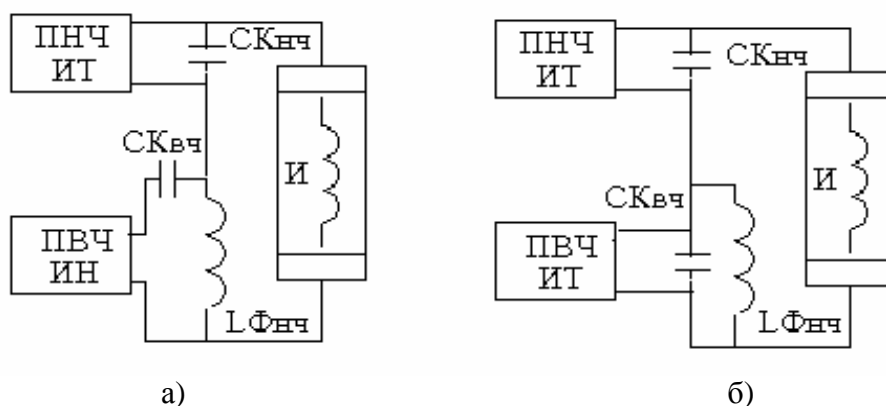


Рис. 3.

Для частотной развязки источников питания во всех случаях используется единственный дополнительный элемент – катушка индуктивности $L_{ФНЧ}$ в роли ФНЧ, блокирующая протекание высокочастотного тока через конденсатор $СК_{НЧ}$ при сложении токов (рис.2) и шунтирующая ПВЧ при сложении напряжений (рис. 3).

Включение $L_{ФНЧ}$ приводит к необходимости компенсировать дополнительную реактивную мощность в нагрузочном контуре на низкой частоте, т.е. соответственно уменьшать емкость конденсатора $СК_{НЧ}$.

Конденсатор $СК_{ВЧ}$ в схеме сложения токов (рис. 2), кроме компенсации реактивной мощности индуктора на высокой частоте, выполняет также роль ФВЧ и блокирует протекание низкочастотного тока в цепи ПВЧ ИН.

Конденсатор $СК_{НЧ}$ в схеме сложения напряжений (рис. 3), кроме компенсации реактивной мощности индуктора на низкой частоте, выполняет также роль ФНЧ и шунтирует ПНЧ на высокой частоте.

Для обеспечения потенциальной развязки источников питания необходимо подключать хотя бы один из источников к нагрузочной цепи через трансформатор. Учитывая, что масса и размеры трансформатора на высокой частоте существенно меньше, целесообразно именно ПВЧ выполнять с трансформаторным выходом.

СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ ИНДУКТОРА ПРИ ПИТАНИИ ОТ ДВУХЧАСТОТНОГО ИСТОЧНИКА

На низкой и высокой частоте параметры схемы замещения индуктора существенно различаются. Чтобы правильно согласовать каждый источник с индуктором и отразить реальные резонансные свойства нагрузочной цепи, состоящей из индуктора, компенсирующих конденсаторов и развязывающих фильтров, необходимо использовать модель индуктора, которая обладает частотно-избирательными свойствами.

На рис. 4 представлена схема замещения индуктора, адекватно отражающая его свойства на двух заданных частотах.

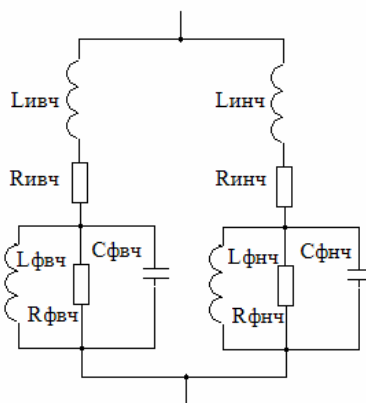


Рис. 4.

Схема замещения состоит из двух параллельных ветвей, каждая из которых описывает индуктор на одной из рабочих частот. Последовательно с LR – схемой замещения индуктора на конкретной частоте включен резонансный заграждающий фильтр, настроенный на вторую частоту нагрева. Так, например, последовательно со схемой замещения индуктора на высокой частоте Lивч, Rивч включен заграждающий фильтр, настроенный на низкую частоту. Таким образом, мощность на низкой частоте выделяется в сопротивлении Rивч модели индуктора, на высокой – в Rивч.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СХЕМЫ СЛОЖЕНИЯ ТОКОВ

Ниже приводятся результаты моделирования во временной области двухчастотной системы питания при сложении токов инвертора тока, работающего на низкой частоте, и высокочастотного инвертора напряжения, включенных на общий индуктор по схеме рис. 2а.

Двухчастотный источник состоит из двух преобразователей частоты, работающих на общую нагрузку, питание которых осуществляется от сети через выпрямители [2, 4]. В качестве преобразователей частоты используются мостовые транзисторные инверторы: для низкой частоты – параллельный инвертор тока, а для высокой частоты – последовательный инвертор напряжения.

Согласование последовательного инвертора напряжения с нагрузкой осуществляется с помощью высокочастотного трансформатора. Для согласования параллельного инвертора тока используется управляемый выпрямитель, за счет регулирования выходного напряжения которого, обеспечивается нужный уровень напряжения на выходе инвертора.

Расчетная кривая напряжения на индукторе показана на рис. 5, а на рис. 6 – форма тока и напряжения на транзисторах инвертора напряжения (рис.6а) и инвертора тока (рис. 6б).

По результатам моделирования можно сделать вывод, что развязывающие цепи практически устраняют влияния источников друг на друга. Транзисторы каждого из

них работают в оптимальном режиме коммутации, а напряжение на индукторе имеет требуемую форму.

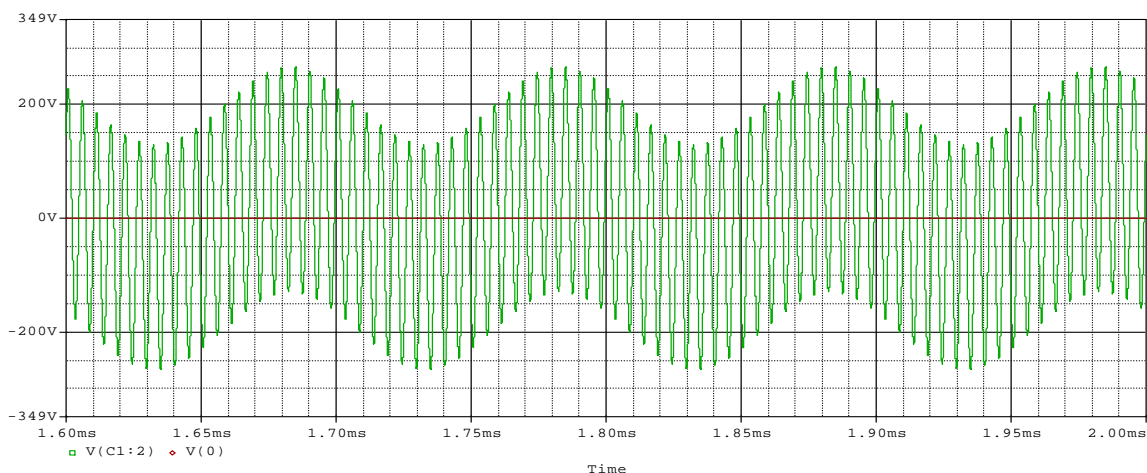


Рис. 5.

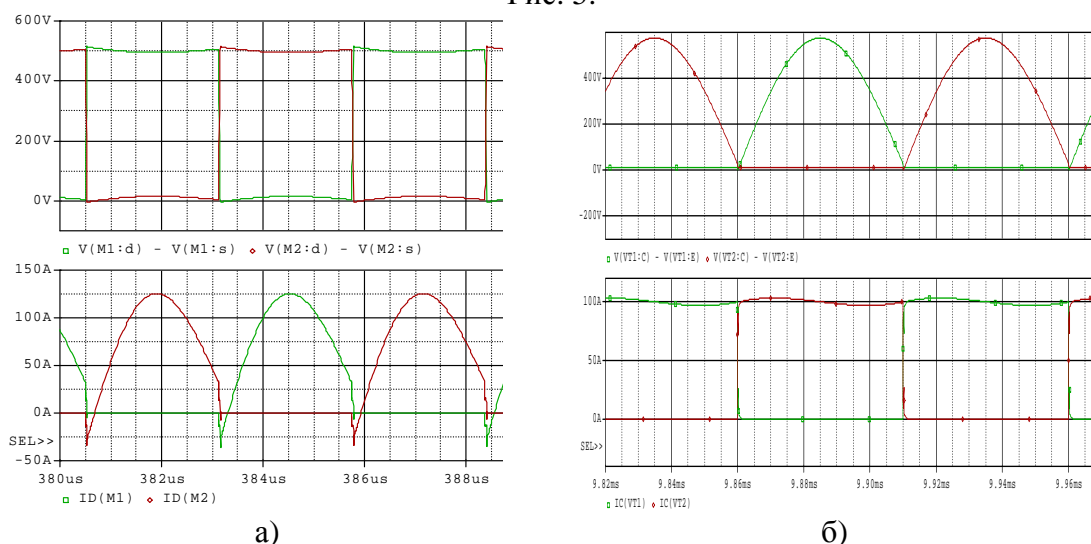


Рис. 6.

В то же время, при использовании такой схемы питания требуется два разнотипных источника питания, что резко удорожает установку и снижает ее конкурентоспособность.

ГЕНЕРАЦИЯ ДВУХЧАСТОТНОГО ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ПУТЕМ МОДУЛЯЦИИ НАПРЯЖЕНИЯ ПИТАНИЯ ИНВЕРТОРА

Низкочастотная составляющая в выходном напряжении инвертора может быть получена путем сложения колебаний близких частот – частоты работы инвертора и частоты модуляции напряжения питания инвертора. Соответствующая настройка нагрузочных контуров позволяет выделить мощность в индукторе на этих частотах.

На рис. 7 показаны управляющие сигналы силовых транзисторов инвертора и модулированное напряжение питания инвертора.

На рис. 8 приведен график тока в индукторе, а на рис. 9 – токи и напряжения на транзисторах инвертора напряжения при частоте работы инвертора 280 кГц и частоте модуляции напряжения питания инвертора 270 кГц. Видно, что ток индуктора имеет две частотные составляющие – 10 кГц и 280 кГц, а коммутация транзисторов инвертора напряжения происходит в мягком режиме.

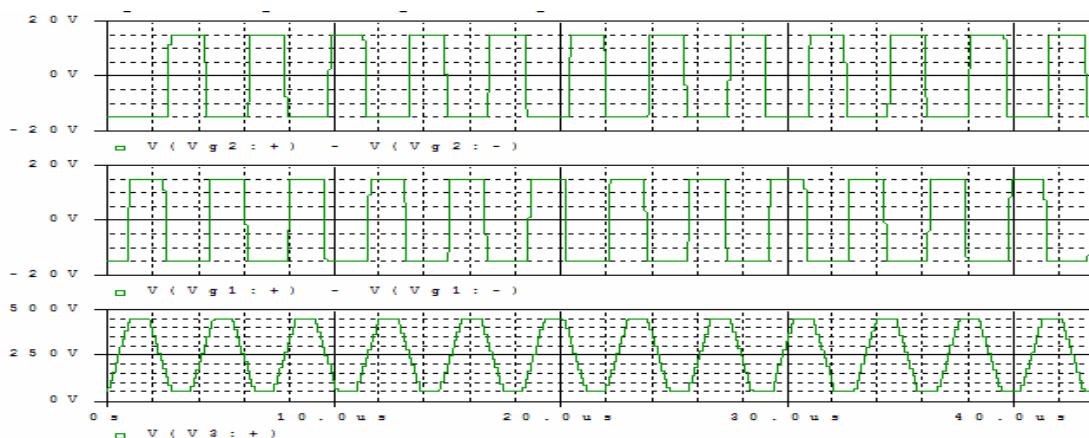


Рис. 7.

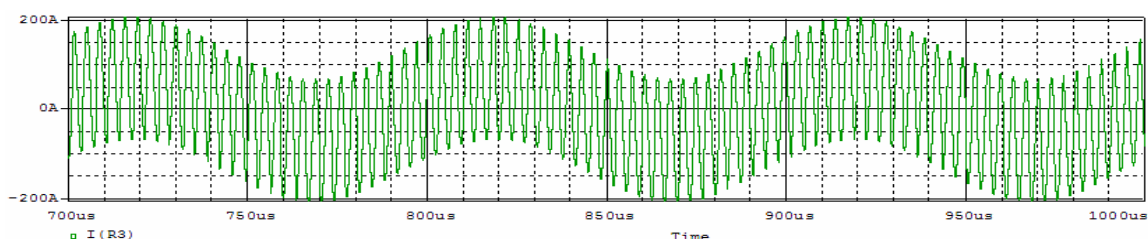


Рис. 8.

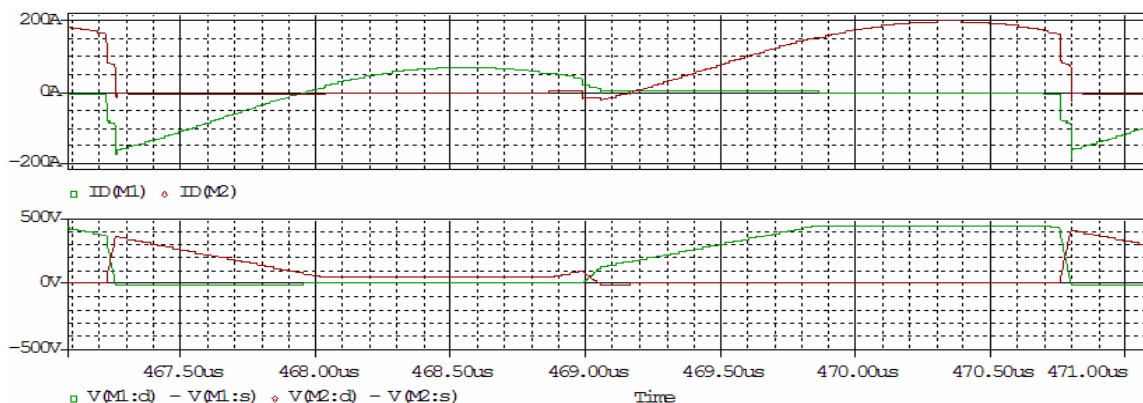


Рис. 9.

Режим с модуляцией напряжения питания инвертора реализуем, однако имеет достаточно сложную систему управления, а постоянно меняющийся режима работы силовых транзисторов инвертора приводит к снижению надежности преобразователя.

ПООЧЕРЕДНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ ДВУХ РАЗНЫХ ЧАСТОТ ОДНИМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ

Импульсный режим работы преобразователя при изменении частоты работы инвертора на каждом импульсе наиболее просто реализуется в безынерционном преобразователе на базе инвертора напряжения.

Этот режим требует либо переключения выходных цепей, согласующих преобразователь с индуктором на разных частотах, либо использования частотно избирательной согласующей цепи, которая обеспечивает эффективную передачу мощности в индуктор на двух рабочих частотах, как, например, на рис. 2б.

На рис. 10 показана расчетная схема инвертора напряжения с трансформаторным выходом, нагруженная на резонансную цепь, элементы которой выполняют следующие функции: C_{fhf} – компенсация реактивной мощности индуктора на высокой частоте и блокирование протекания низкочастотного тока по вторичной обмотке трансформатора L_{t2} ; L_{lhf} – блокирование протекания высокочастотного тока через обмотку трансформатора L_{t2l} ; C_{klf} – компенсация реактивной мощности индуктора и дополнительной индуктивности L_{lhf} на низкой частоте. Трансформатор L_{t1} , L_{t2} , L_{t2l} обеспечивает согласование сопротивления индуктора с инвертором на рабочих частотах.

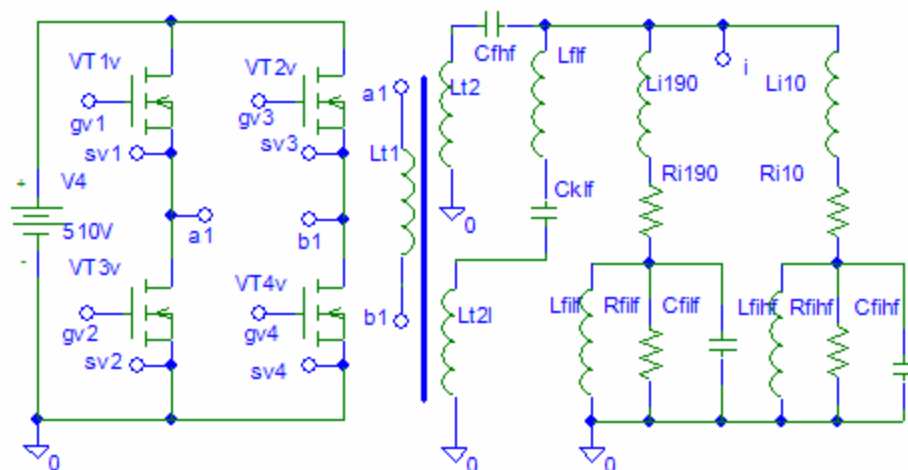


Рис. 10.

На рис. 11 показаны результаты моделирования процесса генерации двух последовательных импульсов на частоте 10 кГц и 190 кГц (на нижнем графике – ток индуктора, на среднем – напряжение на индукторе и на верхнем – мгновенные значения активной мощности, выделяющейся в индукторе). Видно, что резонансные нагрузочные контура обеспечивают эффективную передачу энергии в индуктор на рабочих частотах. Длительность переходных процессов в начале каждого импульса не превышает 1 мс, что позволяет многократно переключать выходную частоту в процессе нагрева зубчатого колеса под закалку, обеспечивая требуемое температурное поле.

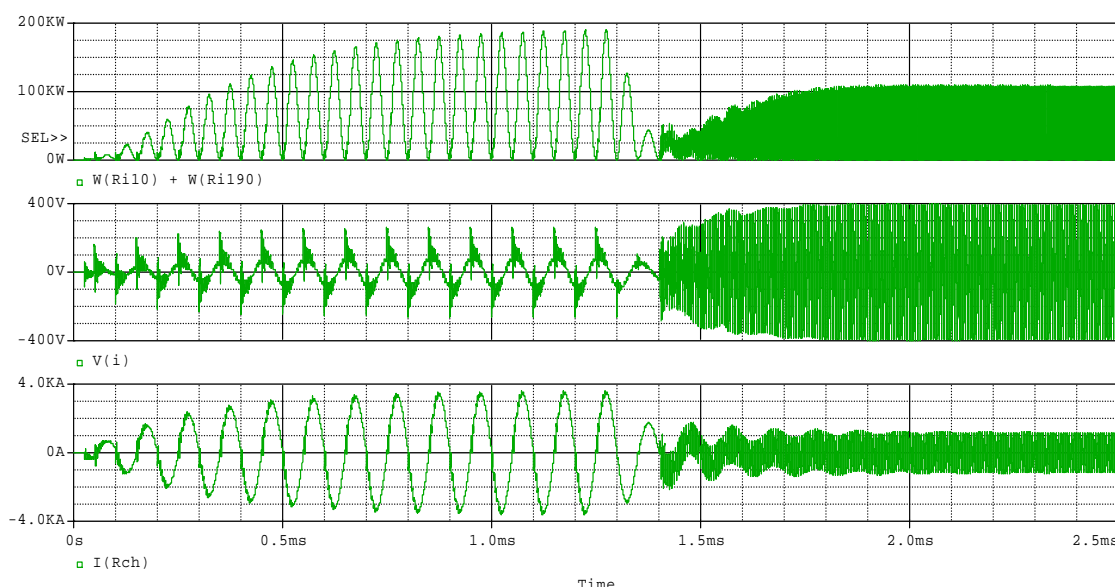


Рис. 11.

Данный способ генерации двухчастотного напряжения имеет преимущества перед другими, так как позволяет воспользоваться одним стандартным преобразователем частоты на базе инвертора напряжения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Двухчастотный нагрев зубчатых колес обеспечивает высокое качество поверхностной закалки, что делает актуальной разработку соответствующих источников питания. Так как в общем объеме применения индукционного нагрева в промышленности для разнообразных технологий поверхностная закалка зубчатых колес занимает незначительное место, двухчастотные системы питания являются уникальными и обходятся потребителю не дешево. В связи с этим, для расширения внедрения в производство этой перспективной технологии особую важность приобретает снижение стоимости таких преобразователей. Для этого необходимо отказаться от создания уникальных систем питания, включающих в свой состав преобразователи, выполненные по различным схемам, и пойти по пути настройки стандартного источника питания на базе инвертора напряжения на работу в двухчастотном режиме.

Исследования показали, что такая настройка требует лишь изменения алгоритма управления преобразователя и проектирования согласующих цепей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Слухоцкий А. Е., Рыскин С. Е. Индукторы для индукционного нагрева. Л.: Энергия, 1974, 264 с. с ил.
2. Schwenk, W., Peter, H.-J.: Anwendung des Zweifrequenz-Simultan-Verfahrens zum induktiven Randschichthärten. *elektrowärme international*, Heft 1/2002, S. 13-18.
3. Peter, H.-J.: Simultaneous dual-frequency induction hardening (SDF Method) a new way of heat treatment. *International Induction Heating Seminar (IHS)*, Padua, Juni 2004, S. 569-575.
4. Г. Конрад, С.В. Дзлиев, Г.-Й. Петер. Новые разработки полупроводниковых преобразователей частоты для индукционного нагрева. Сб. докл. НТС "Электротехнологии на рубеже 20 – 21 веков. К 100-летию проф. Свенчанского А. Д.", Изд. МЭИ, М.: 2005, с.89 – 98.