

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЭНЕРГИИ ИНФРАНИЗКОЙ ЧАСТОТЫ

Ж.Д. ДАВИДЯН, Р.Т. ГАСПАРЯН

Рассмотрен коммутационный полупроводниковый преобразователь напряжения сети 50 Гц в синусоидальное напряжение инфранизкой частоты, а также одно из его применений для перемешивания расплава в индукционных тигельных установках высокочастотной плавки металлов.

В ряде областей промышленности и научных исследований – гидролокации, сейсмологии, геологоразведке – необходимо использование напряжения регулируемой инфранизкой частоты порядка 0,2 – 2 Гц. При этом форма напряжения низкой частоты должна быть практически синусоидальной.

Напряжения и энергии таких частот могут быть получены преобразованием напряжения промышленной сети 50 Гц.

Создание электромашинных двигателей-генераторов на такие низкие частоты практически невозможно из-за крайней нецелесообразности конструкции электрических машин на такие, весьма низкие, скорости вращения – по массо-габаритным и стоимостным показателям.

Полупроводниковые коммутационные преобразователи на базе инверторов или реверсивных выпрямителей, обеспечивающих синусоидальную форму выходного напряжения, требуют сложную систему управления, мощных низкочастотных фильтров и также весьма нецелесообразны по массо-габаритным и стоимостным показателям.

Ниже рассматривается схема полупроводникового преобразователя напряжения сети 50 Гц в синусоидальное напряжение инфранизкой частоты с промежуточным звеном высокой частоты (порядка 1000 Гц или выше). Схема преобразователя приведена на рис.1.

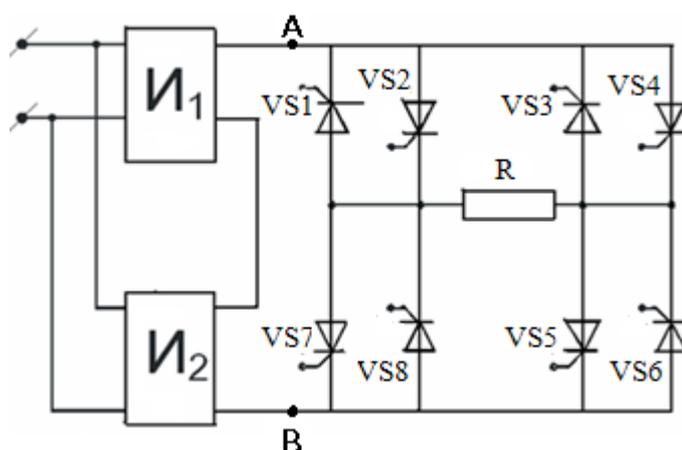


Рис. 1. Схема преобразователя

Преобразователь состоит из двух инверторов И1 и И2, своими входами подключенными параллельно к напряжению промышленной сети 50 Гц. Инверторы выполнены со звеном постоянного тока по схеме “выпрямитель – стабилизированный инвертор высокой частоты”. Частоты выходных напряжений инверторов отличаются на небольшую величину, соответствующую выходной инфранизкой частоте преобразователя. Выходы инверторов включены последовательно и подсоединены к нагрузке R через реверсивный выпрямитель, состоящий из двух мостовых выпрямителей, соответственно, на тиристорах VS1, VS2, VS3, VS4 и VS5, VS6, VS7, VS8.

Диаграмма напряжений преобразователя приведена на рис.2.

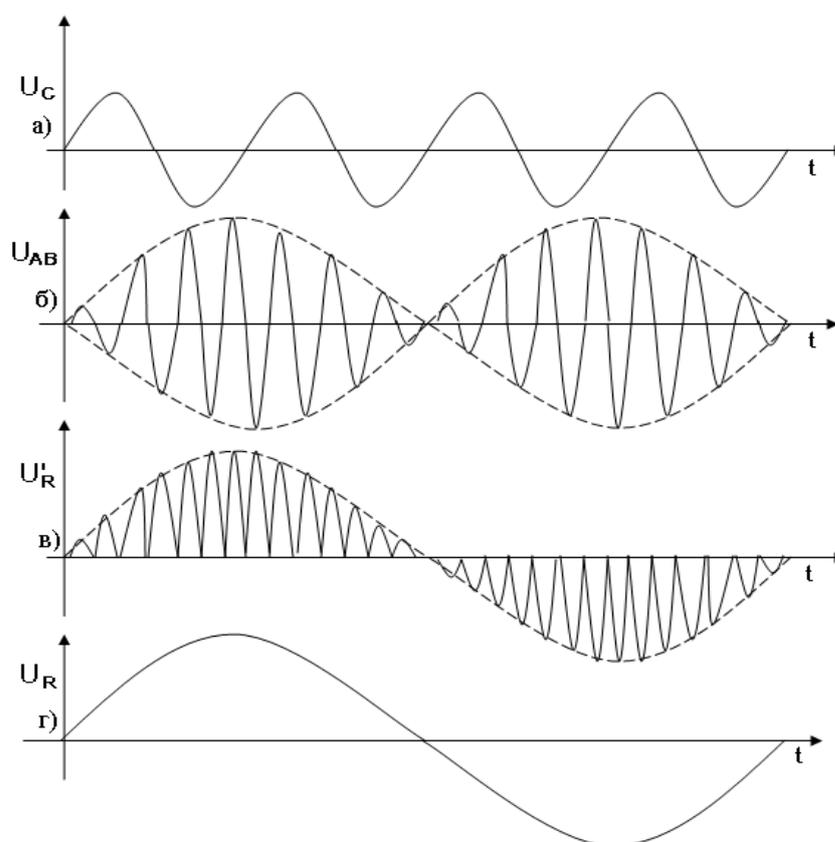


Рис. 2. Диаграмма напряжений

На осях диаграмме изображены соответственно: а) U_C – напряжения сети, б) U_{AB} – напряжение на выходе инверторов, в) U_R' – реверсированное напряжения на нагрузке, г) U_R – отфильтрованное напряжения на нагрузке.

При работе инверторов их выходные напряжения векторно суммируются и в точках АВ образуется переменное напряжение высокой несущей частоты, модулированной напряжением, частота которого равна полуразности частот инверторов И1 и И2 (рис.2в).

При сложении выходных напряжений высокочастотных инверторов, работающих на близких частотах ω_1 и ω_2 , мгновенные значения которых имеют вид (рис. 2).

$$u_1 = U_m \sin(\omega_1 t + \varphi_1); \quad u_2 = U_m \sin(\omega_2 t + \varphi_2); \quad (1)$$

Получим:

$$U_{AB} = 2U_m \sin \left[\left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{2} \right) t + \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} \right] \cdot \cos \left[\left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{2} \right) t + \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2} \right], \quad (2)$$

где U_{AB} - суммарное выходное напряжение на выходе соединенных инверторов в точках АВ, это напряжение представляет собой представляет собой низкочастотное синусоидальное напряжение с угловой частотой $\omega = (\omega_1 - \omega_2)/2$, заполненной напряжением с угловой частотой $\omega = (\omega_1 + \omega_2)/2$:

Вид инверторов – инверторы напряжения, тока или резонансные, а также степень приближения к синусоидальности их выходного напряжения – не имеют принципиального значения. Стабилизация напряжения инверторов обеспечивается либо питающим напряжением постоянного тока посредством фазового управления выпрямителя, либо в самом инверторе посредством широтно-импульсной модуляции. Более целесообразно использование инверторов напряжения.

Далее полуволны модулированного напряжения соединенных инверторов (рис.2в) поочередно выпрямляются реверсивным выпрямителем и, таким образом, на выходе преобразователя формируется переменное напряжение, огибающая которого представляет собой синусоиду инфранизкой частоты (рис.2г).

Изменением частоты инверторов, или хотя бы частоты одного из них, на небольшую величину достигается изменение инфранизкой выходной частоты преобразователя на полуразность частот инверторов. Соотношение частот в преобразователе, имеющие место в опытном образце, приведены в табл.1.

Таблица 1

NN	Частота инвертора И1 $f1,$ Гц	Частота инвертора И2 $f2,$ Гц	Частота несущей выходного напряжения $(f1+f2)/2,$ Гц	Частота огибающей выходного напряжения $(f1-f2)/2,$ Гц
1	1000	994	997	3
2	1000	995	997,5	2,5
3	1000	997	998,75	1,5
4	1000	998	999	1
5	1000	999	999,5	0,5
6	1000	999,5	999,75	0,25

Особенность и основное преимущество этого преобразователя состоит в том, что синусоидальность выходного напряжения обеспечивается схемно – векторным суммированием выходных напряжений инверторов. При этом не требуются фильтры низкой частоты. Сглаживание напряжения несущей частоты обеспечивается высокочастотными фильтрами весьма небольшой мощности. Если нагрузка обладает значительной индуктивностью, то она может обеспечить высокочастотную фильтрацию, при этом высокочастотные фильтры могут вовсе не требоваться.

Ниже излагается одно из применений указанного преобразователя инфранизкой частоты.

В электроэнергетических тигельных установках высокочастотной плавки металлов имеется необходимость перемешивания расплава в процессе плавки с целью равномерного распределения температуры и получения однородного химического состава металла.

На рис.3 приведена схема индукционной тигельной установки для высокочастотной плавки металлов. Тигель 1 с помещенной в нем расплавляемой шихтой металла 2 охвачен соленоидом 3 индуктора, в котором протекает ток высокой частоты от источника питания 4. Вихревые токи, возникающие в массе металла, выделяют тепло, расплавляющее металл, помещенный в тигель.

Высокочастотное поле соленоидного индуктора создает в расплаве определенные электромагнитные усилия, перемешивающие массу расплава.

Создаваемое этими силами давление сжатия возрастает от поверхности к оси [1,2], рис. 3. Одновременно известно, что создаваемое усилие, вызывающее перемешивание расплава, обратно зависит от частоты тока в обмотке индуктора.

$$P_{сж} = 2\pi \cdot 10^{-7} p_0 \cdot \frac{\Delta}{p_2} = 3.16 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{P_0}{\sqrt{p_2 f}},$$

где p_0 - удельная поверхностная мощность, Вт/м²; p_2 - удельное сопротивление расплава, Ом./м; Δ - глубина проникновения тока в расплав, м; f - частота сети.

Учитывая, что частота рабочего тока в обмотке индуктора весьма велика – порядка десятков килогерц, использование токов инфранизких частот для перемешивания расплава в тигельной печи приведет к увеличению усилий перемешивания в сотни раз (3), что является весьма эффективным.

Для создания усилий перемешивания расплавляемой массы металла посредством токов инфранизкой частоты используется существующий соленоид индуктора, который периодически кратковременно отключается от источника питания высокой частоты и подключается к преобразователю – источнику питания инфранизкой частоты. (На рис.3 оба источника питания имеют обозначение 4.) Протекающий в соленоиде индуктора переменный ток создает поток, направленный по оси 5, и вторичный ток 6 в массе металла, от взаимодействия которых создаются радиальные усилия 7, направленные к центру.

Траектории динамических сил, возникающих в массе расплава, и которые вызывают перемешивание, показаны на рис.4. (Обозначения на рис.4 те же, что и на рис.3)

Независимо направления тока и магнитного потока радиальные силы (7) всегда направлены от стены тигеля в центр (рис. 3, 4), в результате которого ток проходящий через обмотку индуктора (3) создает низкой частотой, однонаправленные силы от стены тигеля в центр (7) (рис. 3, 4). В индукционных печах расплавленный металл испытывает радиальное давление (сжатие), под действием которого происходит перемещение массы металла по направлению 8 (рис.4), подъем уровня металла по оси тигеля на высоту по отношению к уровню краев (создается мениск), Расплавленный металл стекает вдоль поверхности мениска и тигеля, поднимается снова вдоль оси, т.е. происходит перемешивание всей массы металла.

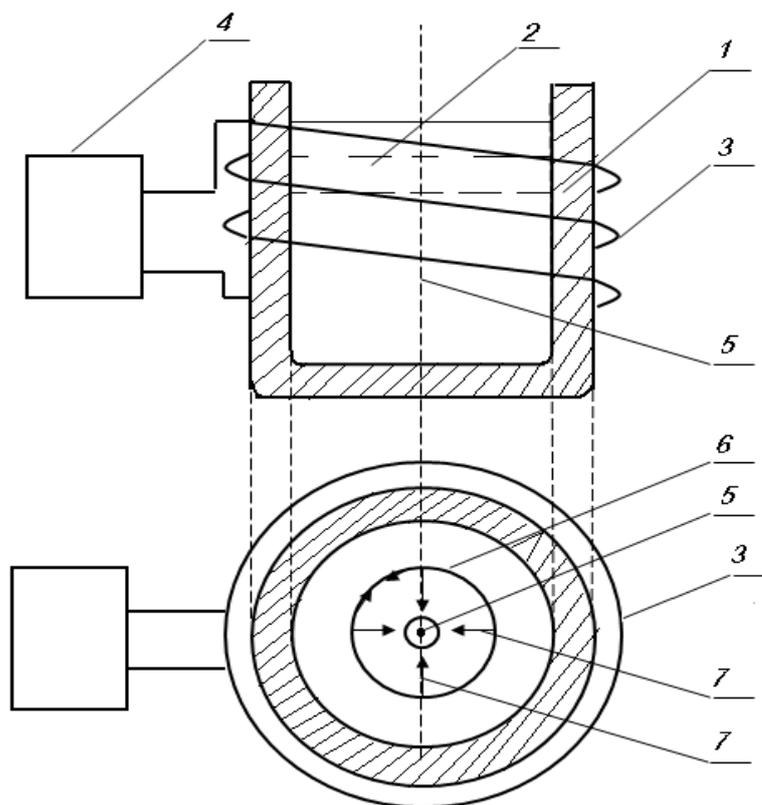


Рис. 3. Схема индукционной тигельной установки для плавки металла

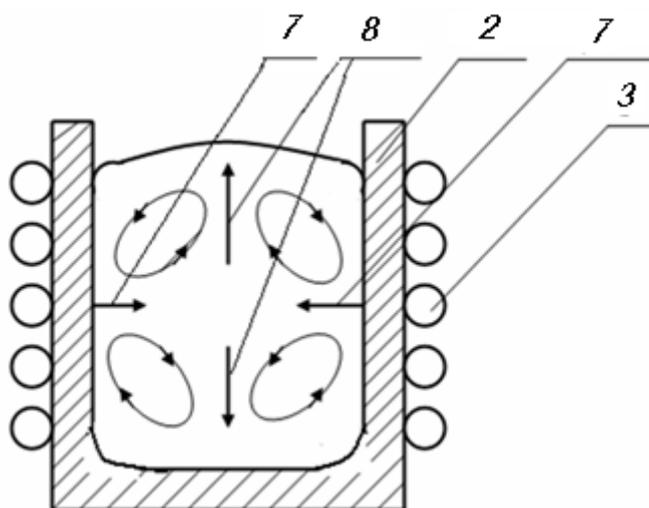


Рис. 4. Перемещение массы металла

ЛИТЕРАТУРА

1. Шамов А.Н., Бодажков В.А. Проектирование и эксплуатация высокочастотных установок. Л.:Машиностроение, Ленинградское отделение. 1974.
2. Установки индукционного нагрева. Для студентов ВУЗов//Под ред. А.Е.Слухоцкого. Л.:Энергоиздат. Ленинградское отделение. 1981.
3. Вентильные преобразователи частоты, схемы и коммутационные процессы/Тезисы докладов всесоюзного совещания. Свердловск. 1997.
4. Давидян Ж.Д., Гаспарян Р.Т. Узел перемешивания расплава в индукционной тигельной печи. Патент на изобретение N 2451А. Армения. 2010.

ЖАН ДАВИДОВИЧ ДАВИДЯН, доктор техн.наук, профессор
E-mail: jan.davidyan@gmail.com