

## Вакуумная, плазменная и квантовая электроника

УДК 621.385.633

Е.Д. Белявский, д-р физ.-мат. наук, В.В. Шинкарук

### Преобразование некогерентных сигналов в автофазных приборах СВЧ О-типа

Предложена схема реализации двухчастотного преобразования в автофазных приборах СВЧ и соотношения для их расчета.

The scheme of realization two-frequency transformation in autophase HF-devices and ratios for their calculation is proposed.

#### Введение

В [1] предложен ряд способов некогерентного преобразования частот на основе явления захвата электронных сгустков полем двух электромагнитных волн разной азимутальной симметрии в продольных статических полях. Идея такого преобразования состоит в том, что одна из двух разночастотных волн (с большей частотой) захватывает электронные сгустки, определяя тем самым периодичность их следования, а вторая низкочастотная волна играет роль источника накачки энергии, причем однонаправленное преобразование энергии одной из волн в энергию другой волны достигается путем профилирования статических полей вдоль длины преобразователя.

В данной работе исследуется возможность такого преобразования частот и предложен способ практической реализации усиления СВЧ энергии.

#### Исходные положения

Рассмотрим аксиальносимметричный электронный поток, распространяющийся вдоль оси  $z$  в статическом фокусирующем магнитном поле  $B$  и продольном высокочастотном электрическом поле, состоящем из двух бегущих волн:

$$E_z = \operatorname{Re}[-j\mathcal{E}_1 e^{j(\omega t - n\theta - \int h_0 dz)}] + \operatorname{Re}[-j\mathcal{E}_2 e^{j(\Omega t - \int h_2 dz)}], \quad (1)$$

где  $\mathcal{E}_1(z)$ ,  $\mathcal{E}_2(z)$  – комплексные амплитуды волн с частотами  $\omega$  и  $\Omega$  и с продольными волновыми числами  $h_0 = \frac{\omega}{v_{\phi 1}}$  и  $h_2 = \frac{\Omega}{v_{\phi 2}}$ , соответ-

ственно;  $v_{\phi 1}$  и  $v_{\phi 2}$  – фазовые скорости соответствующих волн. Из (1) видно, что первая (высокочастотная) из волн азимутально-несимметрична,  $n$  – азимутальное целое волно-

вое число,  $z$  – продольная, а  $\theta$  – угловая цилиндрические координаты,  $t$  – текущее время. В дальнейшем предполагаем, что катод пушки, создающей электронный поток, полностью экранирован от магнитного поля.

Захват электронных сгустков происходит полем первой волны с частотой  $\omega$ , причем, как это показано в [1], монотонное преобразование энергии одной волны в энергию другой волны возможно только при равенстве их фазовых скоростей:

$$v_{\phi 1} = v_{\phi 2} = v_{\phi}. \quad (2)$$

При выполнении (2) можно ввести новую координату  $X = \omega t - n\theta - \int h_0 dz$ . Тогда поле (1) примет следующий вид:

$$E_z = \operatorname{Re}[-j\mathcal{E}_1 e^{jX}] + \operatorname{Re}[-j\mathcal{E}_3 e^{jvX}], \quad (3)$$

где  $\mathcal{E}_3 = |\mathcal{E}_2| e^{j\varphi_3}$ ,  $\varphi_3 = \arg \mathcal{E}_2 + v n \theta$ ,  $v = \frac{\Omega}{\omega} = 1$ .

В случае, когда сигналы с частотами  $\omega$  и  $\Omega$  получены от разных источников, то они являются некогерентными, т.е.  $1/v$  не есть целое.

Обозначим:  $X_0$  – фазовая координата центра захваченного сгустка электронов, относительно которого происходят нелинейные колебания всех электронов в сгустке.

В [1] получены следующие условия захвата сгустков в  $k$ -м периоде высокой частоты ( $k = 0; \pm 1; \pm 2; \dots$ )

$$X_0 = -x_{0k} + 2\pi r k; \quad (4)$$

$$(0 \leq x_{0k} \leq 2\pi)$$

$$\sin x_{0k} = \frac{E_3^{(k)}}{E_1}; \quad (5)$$

$$E_3^{(k)} = E_H + E_3 \sin(v 2\pi k + \varphi_3), \quad (6)$$

где  $E_3 = |\mathcal{E}_3|$ ;  $E_1 = |\mathcal{E}_1|$ ;  $E_H = -\frac{d}{dz} \left[ \frac{(\omega - n\dot{\theta})^2}{2\eta h_0^2} \right]$ ,

$\dot{\theta} = \frac{d\theta}{dt} = \frac{\eta B}{2}$  – азимутальная скорость электронов

в статическом магнитном поле ( $B=B(z)$ , магнитное поле неоднородно),  $\eta$  – отношение заряда электрона к его массе покоя.

$$\cos x_{0k} > -\frac{E_3}{E_1} v \cos(v 2\pi k + \varphi_3) \quad (7)$$

При  $E_3^{(k)} > 0$  захваченный сгусток будет передавать энергию частоте  $\omega$ , а при  $E_3^{(k)} < 0$  забирать у нее эту энергию.

В данной работе мы ограничились рассмотрением наиболее интересного для применения случая, когда усиливаться будет волна с частотой  $\omega$ . В этом случае условие  $E_3^{(k)} > 0$  выполняется для всех  $k$  при

$$|E_H| > E_3, \quad (8)$$

а условие (5) – при

$$|E_H| + E_3 < E_1. \quad (9)$$

Из последнего неравенства видно, что  $E_3$  всегда меньше  $E_1$ . Так как  $v = 1$ , то в (7) можно пренебречь правой частью, т. е.

$$\cos x_{0k} > 0, \quad (10)$$

следовательно, захваченные сгустки во всех периодах располагаются на переходе из ускоряющей фазы поля в тормозящую фазу поля высокой частоты, причем размах колебаний электронов (т.е. ширина сгустка) ограничен неравенством

$$|\sin x_{0k}| < \frac{(1 - \cos X_1)}{\sqrt{(1 - \cos X_1)^2 + (X_1 - \sin X_1)^2}}, \quad (11)$$

где  $X_1 = X - X_0 = X + x_{0k} - 2\pi k$ .

Еще одно условие устойчивости [1]:

$$\operatorname{sgn} \frac{dn}{dz} < 0 \quad (12)$$

выполняется при  $\omega > n\omega$ , если  $E_H \leq 0$ , (13)

случай  $\omega < n\omega$  реализуется при  $E_H \geq 0$ . (14)

Усиление сигнала частоты  $\omega$  возможно только при  $E_3^{(k)} > 0$ , т.е.  $E_H > 0$ , что соответствует случаю (14).

Приведенные соотношения будут использоваться при дальнейшем анализе.

### Возможная схема реализации некогерентного усилителя

Особенность конструкции и принципа действия усилителя, описанного в данном разделе, заключается в том, что в данном случае электронный поток находится в продольном соленоидальном магнитном поле с индукцией  $B$  фокусирующей системы, экранированной от электронной пушки и выполняется по крайней мере один скачок магнитной индукции и фазовой скорости, удовлетворяющие условию

$$\Delta v_\phi = \left( \frac{m\eta}{2\omega_\phi} \right) \Delta(Bv_\phi), \quad (15)$$

где  $\Delta v_\phi$  – изменение фазовой скорости;  $\Delta(Bv_\phi)$  – изменение производной магнитной индукции и фазовой скорости;  $n$  – номер азимутальной волны;  $\eta = \frac{e}{m_0}$  – отношение заряда к его массе покоя.

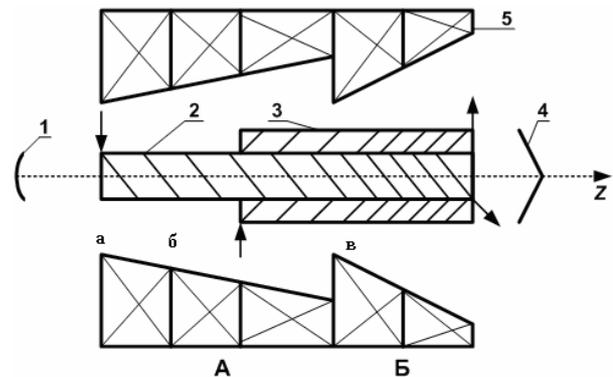


Рис. 1. Схематическое изображение усилителя

Одновременно с этим на участках до и после скачок фазовой скорости изменяют магнитное поле так, что крутизна его изменения в направлении  $z$  от первой секции ко второй удовлетворяет условиям:

$$\left| \left( \omega - m\eta \frac{B}{2} \right) \frac{n}{2h_0^2} \frac{dB}{dz} \right| \geq E_3; \quad (16)$$

$$\left| \left( \omega - m\eta \frac{B}{2} \right) \frac{n}{2h_0^2} \frac{dB}{dz} \right| + E_3 < E_1.$$

Преобразователь содержит электронную пушку 1, экранированную от соленоидальной магнитной системы 5, электродинамическую систему, состоящую из высокочастотной 2 и низкочастотной 3 замедляющих систем с разделенными входами и выводами энергии и коллектора 4. В ЗС-2 распространяется азимутально-несимметрическая волна, а в ЗС-3 азимутально-симметрическая волна электромагнитного поля. Сопротивление связи в обеих ЗС изменяется вдоль оси  $z$  (изменение сопротивления связи показано на рисунке изменением пролетного канала, который является общим для обеих ЗС). Электродинамическая система состоит из двух секций А и Б, причем в секции А имеется по крайней мере один участок с пониженным сопротивлением связи (б) в высокочастотной ЗС-2, а в секции Б имеется по крайней мере один скачок фазовой скорости (показано изменением частоты вертикальной штриховки ЗС) и амплитуда магнитного поля в магнитной системе 5 изменяется (плавно или скачкообразно; на рисунке изменение магнитного поля показано изменением внутреннего диаметра соленоида).

Преобразование СВЧ сигналов реализуется следующим образом. На вход ЗС-2,3 электродинамической системы подаются СВЧ сигналы с круговыми частотами  $\omega$  и  $\Omega$ , мощности сигналов превышают мощность пучка на входе в ЗС. Так как в секции А электродинамической системы в высокочастотной ЗС-2 имеются участки с пониженным сопротивлением связи (б), то здесь происходит обычная каскадная группировка электронного пучка на высокой частоте  $\omega$ .

В секции Б электродинамической системы происходит захват высокочастотных сгустков частотой  $\omega$  за счет восстановления сопротивления связи на участке (в) в ЗС2. При этом захваченные электронные сгустки не могут покинуть ВЧ-период, в котором они захвачены, и, следовательно, сохраняют неизменным свое фазовое положение в поле низкой частоты  $\Omega$ .

Для выяснения условий, при которых осуществляется устойчивое преобразование энергии между частотами  $\Omega$  и  $\omega$  рассмотрим, как это было сделано в разделе 2, электронный поток, распространяющийся вдоль оси  $z$  в продольном статическом магнитном поле  $B$ , в поле азимутально-несимметричной волны высокой и азимутально-симметричной волны низкой частот. Примем, что ВЧ поля велики настолько, что можно пренебречь силами объемного заряда в пучке, что позволяет упростить анализ исследуемого эффекта. Ограничимся рассмотрением нерелятивистского приближения. При принятых допущениях уравнение движения записывается в виде:

$$\frac{d^2 z}{dt^2} = \eta \left[ \operatorname{Re} \left[ -j \frac{E_1}{v\phi} e^{j(\omega t - n\theta - \int \frac{\omega}{v\phi} dz)} \right] + \operatorname{Re} \left[ -j \frac{E_2}{v\phi} e^{j(\Omega t - \int \frac{\Omega}{v\phi} dz)} \right] \right]. \quad (17)$$

Введем новую переменную:

$$X = \omega t - n\theta - \int \frac{\omega}{v\phi} dz. \quad (18)$$

Подставляя (18) в (17) и применяя к получившемуся уравнению теорию Ляпунова об устойчивости колебательного движения частиц, получаем условия устойчивости захваченного сгустка, совпадающие с уравнениями (4–5).

В рассмотренной схеме усилителя все условия можно реализовать путем введения необходимых соотношений между величинами входных сигналов и величинами сопротивлений связи во второй секции.

Максимальная эффективность будет, если электроны сосредоточены вблизи минимума

(максимума) в периоде низкой частоты, т. е. группировки пучка по низкой частоте. Это можно получить, если начало ЗС-3 расположить в секции А электродинамической системы и понизить сопротивление связи в этой секции по крайней мере на одном участке для создания условий группировки по низкой частоте.

Электронная пушка 1 служит для формирования электронного потока, а коллектор 4 является токоприемником. Магнитная система 5 может быть выполнена в виде соленоида с переменным внутренним диаметром для создания магнитного поля и соответствии с условиями (15) и (16).

Электродинамическая система может быть выполнена, например, в виде двух спиралей, коаксиальных с трубчатым пучком с различными азимутальными видами колебаний. Изменение сопротивления связи можно получить путем изменения диаметров спиралей.

Данный прибор может быть использован при разработке мощных преобразовательно-усилительных устройств с некогерентными частотами и высоким КПД.

## Выводы

На основе теоретических предпосылок, разработанных ранее при рассмотрении явления захвата электронных сгустков полем двух электромагнитных волн и изложенных в [1], предложен способ и схема реализации такого преобразования СВЧ-энергии. Дано подробное описание принципов работы этой схемы, варианты ее практической реализации и приведены основные соотношения для их расчета. Полученные соотношения могут быть использованы в дальнейшем при проектировании схем преобразователей, принцип действия которых основан на эффектах, изложенных в данной работе.

## Литература

1. Е.Д.Белявский. Режим захвата электронных сгустков полем электромагнитной волны с произвольным профилем в приборах О-типа. – Радиотехника и электроника, 1993, 38, N 8, с. 1483–1491.