

Исследование синхронизации гиротрона внешним сигналом на основе модифицированной квазилинейной теории*

Н. В. Григорьева^{1,2}, Н. М. Рыскин^{1,2}

¹Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского

²Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН

✉ preobnv@gmail.com

В настоящее время одним из наиболее важных приложений гиротронов является электронно-циклотронный нагрев плазмы в установках управляемого термоядерного синтеза (УТС) [1]. В связи с этим активно развиваются исследования в области синхронизации гиротрона внешним сигналом [2].

В настоящей работе синхронизация гиротрона внешним сигналом исследуется на основе модифицированной квазилинейной модели. Уравнение возбуждения гиротрона можно записать в виде

$$\frac{dA}{d\tau} + A = I_0 \Phi(|A|^2, \Delta_H) + 2f e^{i\Omega\tau}, \quad (1)$$

где A – безразмерная комплексная амплитуда, I_0 – безразмерный параметр, имеющий смысл нормированного тока, Δ_H – расстройка циклотронного резонанса, $\Phi = \Phi' + i\Phi''$ – комплексная электронная восприимчивость, f – амплитуда внешнего сигнала, а Ω – безразмерная отстройка частоты внешнего воздействия от собственной частоты, τ – безразмерное время.

Функция восприимчивости рассчитывалась с помощью интегрирования уравнений движения электронов в гиротроне при постоянных A и Δ_H , а затем проводилось интерполирование по двум переменным.

Как правило, максимальный КПД гиротрона реализуется в режиме жесткого возбуждения, что приводит к появлению ряда отличий от хорошо изученной картины синхронизации в генераторе с мягким возбуждением [3]. Например, существует так называемый режим регенеративного усиления, когда в автономном гиротроне колебания невозможны, однако при воздействии внешнего сигнала возможно установление вынужденных колебаний, амплитуда которых почти так же велика, как и в режиме

*Работа поддержана грантом Российского научного фонда (проект № 19-79-00307).

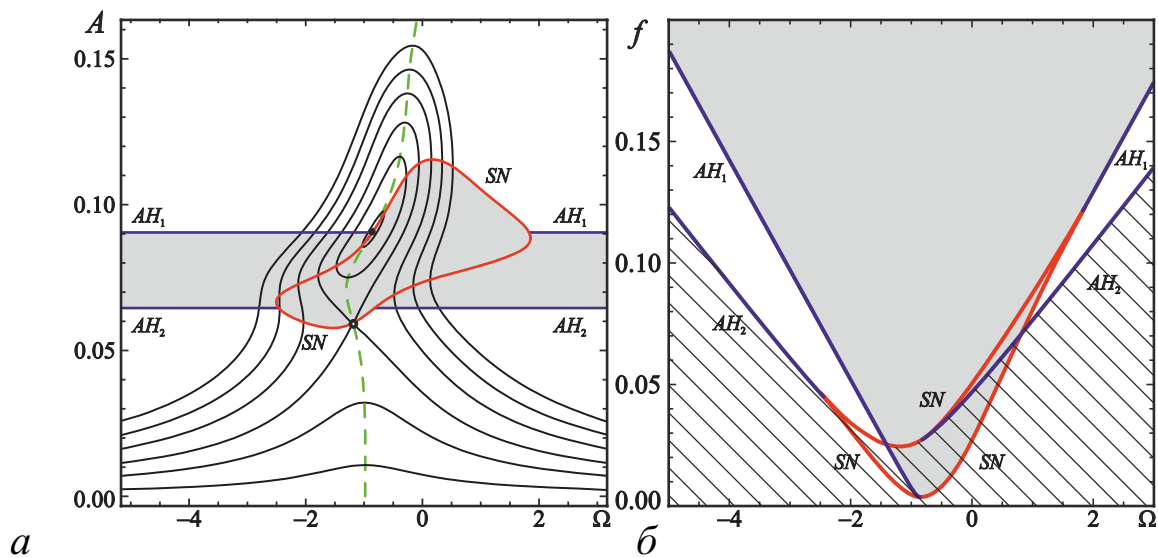


Рис. 1. Резонансные кривые (а), языки синхронизации (б) в случае регенеративного усиления. На рис. 1, а закрашена область неустойчивых состояний. На рис. 1, б закрашена область синхронизации, заштрихована область вынужденных колебаний с малой амплитудой

жесткого возбуждения. На рис. 1 приведен пример резонансных кривых и языка синхронизации для этого случая. На рисунке нанесены линии седлоузловой бифуркации (SN) и бифуркации Андронова–Хопфа (AH). Область синхронизации ограничена линиями SN и AH_1 (на рис. 1, б эта область закрашена серым). Она соответствует границе верхней устойчивой области на рис. 1, а. Второй язык ограничивает сверху область вынужденных колебаний (на рис. 1, б эта область заштрихована), что соответствует границе нижней устойчивой области на рис. 1, а.

Таким образом, в данной работе построены и проанализированы резонансные кривые, т. е. зависимости амплитуды синхронизованных колебаний от частоты Ω при различных амплитудах внешнего сигнала f . Найдены условия устойчивости режимов синхронизации и построены языки синхронизации, т. е. области устойчивости на плоскости параметров Ω, f . Переход в режим синхронизации может осуществляться в соответствии с известными механизмами захвата частоты и подавления собственных колебаний (синхронизация гашением).

Список литературы

1. Thumm M. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2014. Vol. 42, No. 3. P. 590–599.
2. Новожилова Ю. В., Денисов Г. Г., Глявин М. Ю. и др. // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2017. Т. 25. № 1. С. 4–11.
3. Yakunina K. A., Kuznetsov A. P., Ryskin N. M. // Phys. Plasmas. 2015. Vol. 22. No. 11. 113107.