

ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО СТАБИЛИЗАЦИИ ЖЕЛОБКОВОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ С ПОМОЩЬЮ ИНТЕГРИРУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

В. А. Чуянов¹⁾, Е. Г. Мэрфи²⁾

В ряде экспериментов по изучению влияния обратной связи на $m = 1$ мод желобковой неустойчивости на установке Феникс II [1] было показано, что всегда существует остаточная неустойчивость, связанная с частотной характеристикой петли обратной связи. Инкремент этих колебаний пропорционален верхней предельной частоте стабилизирующей системы, и их возникновение ограничивало возможности применения таких систем для стабилизации плазмы. Чтобы преодолеть эту трудность, было предложено [2] уменьшить инкремент остаточных колебаний за счет ограничения частотной характеристики системы обратной связи сверху, т. е. использовать интегрирующий усилитель. Возникающий при этом фазовый сдвиг можно компенсировать, измеряя не флуктуации электрического потенциала, как это делалось в [1] и [3], а флуктуации азимутального электрического поля, или (для заданного азимутального мода колебаний m) за счет азимутального смещения датчика флуктуаций потенциала относительно стабилизирующего электрода на угол $\pi/2m$.

Эксперименты по проверке идеи, изложенной выше, были проведены на установке Феникс II. Использовался тот же стабилизирующий элек-

¹⁾ Институт атомной энергии им. И.В. Курчатова, СССР.

²⁾ Калэмская лаборатория, Великобритания.

трод, что и в работе [1], а для измерений колебаний потенциала с азимутальным модом $m = 1$ применялся электростатический зонд, смещенный по азимуту на 90° . Интегрирующий усилитель обеспечивал в цепи обратной связи коэффициент передачи δ вида

$$\delta(\omega) = \frac{\alpha\beta}{r\omega} \quad (1)$$

вплоть до весьма низких частот $\omega \ll \omega^*$. Здесь α — чувствительность датчика, β — коэффициент усиления, r — постоянная интегрирования, ω^* — частота прецессии ионов вокруг оси установки в неоднородном магнитном поле. Частота желобковых колебаний в системе без обратной связи равна ω^* [2].

Введение такой системы обратной связи привело к существенному изменению поведения плазмы. Порог появления потерь плазмы повышался до некоторой плотности n , зависящей от δ . При этом при плотностях ниже пороговой, как и в [1], наблюдались низкочастотные колебания, однако, в отличие от [1], где амплитуда колебаний при включении обратной связи уменьшалась лишь в 2 раза, в данном случае введение обратной связи сопровождалось уменьшением амплитуды колебаний по крайней мере в 30 раз. При превышении новой пороговой плотности n желобковые колебания вновь возникали и сбрасывали плотность до естественного порога желобковой неустойчивости n_0 . (В данных экспериментах, проведенных при инжекции атомов с энергией 8 кэВ, пороговая плотность $n_0 \approx 1 \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$).

Теория [2] при условии, что ионная плазменная частота меньше ионной циклотронной, дает следующую зависимость пороговой плотности развития желобковой неустойчивости при включенной обратной связи от коэффициента передачи системы обратной связи на частоте прецессии ионов $\delta(\omega^*) = \alpha\beta/r\omega^* = K$.

$$n = n_0(1 - K)^2. \quad (2)$$

(Инвертирующему усилителю соответствуют $K < 0$, неинвертирующему $K > 0$). На рисунке показана теоретическая зависимость (2) (сплошная линия) и результаты измерений при магнитном поле $B = 11 \text{ кгс}$ (треугольники), полученные путем изменения K за счет коэффициента усиления усилителя β . Эксперимент достаточно хорошо согласуется с теорией при $2 \geq K \geq -1$. При $K < -1$ и $K > 2$ система обратной связи самовозбуждалась на низких частотах, где коэффициент передачи очень велик, и стабилизация нарушалась.

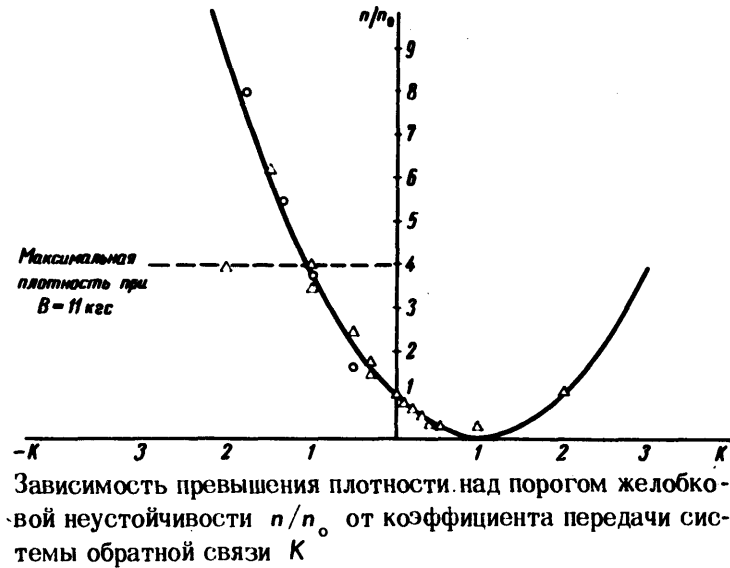
Однако величину K можно менять, не увеличивая усиления и не нарушая условий самовозбуждения, за счет изменения частоты прецессии ионов ω^* при изменении магнитного поля B . Как известно

$$\omega^* \sim 1/B \quad (3)$$

и следовательно $K \sim B$. Таким образом величина n должна изменяться с магнитным полем. Отметим, что порог желобковой неустойчивости

в отсутствие обратной связи согласно и теории и прямым измерениям от магнитного поля не зависит.

Результаты измерения пороговой плотности n при различных магнитных полях (от 6 до 18 кГс) приведены на рисунке кружками. При этом усиление β оставалось неизменным, а коэффициент передачи K вычислялся с учетом изменения поля. Видно, что и в этом случае согласие с зависимостью (2) достаточно хорошее.



Максимальное превышение плотности над порогом желобковой неустойчивости n_0 достигало 8 и ограничивалось самовозбуждением системы обратной связи и технически допустимым магнитным полем.

При таких плотностях можно ожидать появления более высоких мод желобковой неустойчивости. Однако колебаний с $m = 2$ обнаружено не было. Колебания с $m = 3$ с малой амплитудой наблюдались при больших плотностях.

Благодарим доктора Д.Р.Свитмена за многочисленные обсуждения, Е.Томпсона за обсуждения и помощь в работе, а весь персонал Феникса II за отличную работу установки. Один из авторов благодарит администрацию Калэмской лаборатории за гостеприимство и любезно предоставленную возможность выполнения данной работы.

Поступила в редакцию
6 апреля 1971 г.

Литература

- [1] V.A.Chuyanov, E.G.Murphy, D.R.Sweetman, E.Thompson. Proceedings of the Symposium on Feedback and Dynamic Central of plasmas, princeton Universits, June, 1970.
- [2] В.В.Арсенин. Письма в ЖЭТФ, 11, 267, 1970.
- [3] В.В.Арсенин, В.А.Жильцов, В.А.Чуянов. Plasma Physier and Controlled Nuclear Fusion Research (Conference Proceedings,Novosibirsk 1 - 7 august 1968) IAEA VIENNA, 1969. том 2, стр. 528.