

УДК 621.385.69

## ФАЗОВЫЙ ЗАХВАТ ВНЕШНИМ МОНОХРОМАТИЧЕСКИМ СИГНАЛОМ ГИРОТРОНА С НИЗКОЧАСТОТНЫМИ ФЛУКТУАЦИЯМИ НАПРЯЖЕНИЯ И ТОКА

*В. Л. Бакунин, Г. Г. Денисов, Ю. В. Новожилова\**

Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия

Показано, что при фазовом захвате колебаний гиротрона с мегаваттным уровнем мощности относительно слабым внешним монохроматическим сигналом модуляция фазы и частоты излучения, обусловленная низкочастотными флуктуациями ускоряющего напряжения и тока, снижается в несколько раз по сравнению с автономным режимом. Расчёты проведены на примере двух гиротронов мегаваттного уровня мощности: созданного в ИПФ РАН гиротрона, работающего на моде  $TE_{28,12}$  с частотой 170 ГГц [1], а также гиротрона с вдвое большими частотой и индексами рабочей моды (345 ГГц,  $TE_{56,24}$ ), для которого теоретически была показана возможность генерации на мегаваттном уровне мощности при захвате его частоты и фазы внешним сигналом [2].

### ВВЕДЕНИЕ

Разработка и создание комплексов гиротронов для управляемого термоядерного синтеза (УТС), наряду с успешной апробацией квазиоптического синтезированного преобразователя, позволяющего эффективно вводить внешний сигнал в резонатор гиротрона в виде рабочей моды [1, 3], способствовали появлению большого числа публикаций, где теоретически [2, 4–8] и экспериментально [3] исследовано воздействие внешнего сигнала на режимы генерации мощных гиротронов. Как показано в работах [2, 4, 5] и в соответствии с более ранними предсказаниями [9–12], фазовый захват мощных гиротронов позволяет не только стабилизировать частоту и фазу их излучения, но и, благодаря подавлению паразитных мод внешним сигналом, перейти в область более высоких рабочих токов и оптимальных значений коэффициента полезного действия (КПД). В перечисленных работах [2–12] рассматривалось воздействие монохроматического и квазимонохроматического сигнала на гиротрон с постоянными параметрами. Однако в реальных источниках питания гиротронов даже после фильтрации высокочастотных составляющих шумов могут наблюдаться незначительные (порядка 0,2%) низкочастотные технические флуктуации напряжения с характерным временем  $1 \div 1\,000$  мкс [13–17], которые приводят к флуктуациям частоты и фазы поля излучения.

Данная статья посвящена исследованию возможности уменьшения фазовых флуктуаций при воздействии внешнего монохроматического сигнала. Проблема влияния внешнего сигнала на генератор с шумами и возможность уменьшения флуктуаций фазы широко обсуждалась ранее на основе спектрально-корреляционного анализа как для генераторов с квадратичной нелинейностью [18–21], так и для гиротронов [17]. В реальных гиротронах низкочастотные флуктуации параметров представляют собой слабый ограниченный по частоте шум [14, 20, §3.4], который можно рассматривать как набор гармоник с близкими частотами и медленно меняющимися во времени амплитудами. В генераторе с таким шумом можно ожидать уменьшения флуктуаций фазы под воздействием внешнего монохроматического сигнала [20]. В данной работе мы ограничились рассмотрением гиротрона с гармонической модуляцией входных параметров электронного пучка — напряжения, тока и питч-фактора.

\* river@appl.sci-nnov.ru

Проведённые расчёты представляют интерес для установления ограничений на допустимые флуктуации параметров гиротрона, что является актуальным прежде всего для разработки в дальнейшем комплекса когерентно излучающих гиротронов. Такие комплексы могут быть использованы при передаче мощности на большие расстояния [22, 23], нагреве плазмы в больших установках УТС, включая не только ITER, но и обсуждаемый в настоящее время проект DEMO [24–26], а также для ускорения частиц укороченными импульсами излучения мощных гиротронов терагерцового диапазона [27–30].

Следует отметить, что уменьшение флуктуаций частоты и ширины спектра излучения происходит при захвате частоты гиротрона не только внешним сигналом, но и волной, отражённой от резонансной или нерезонансной нагрузки, как было показано теоретически в работах [31, 32] и экспериментально в работе [33].

## 1. МОДЕЛЬ И ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ

Предполагаем, что на временную зависимость ускоряющего напряжения электронного пучка, соответствующую реалистичному сценарию включения [4, 5], накладывается мелкая гармоническая модуляция:

$$\tilde{U}(t) = U_{\text{start}} + (U - U_{\text{start}})[1 - \exp(-t/T_{\text{st}})] + \Delta U \sin(2\pi t/T_{\text{mod}}). \quad (1)$$

Здесь  $\tilde{U}$  — текущее значение напряжения,  $U_{\text{start}}$  и  $U$  — средние значения начального и конечного напряжения соответственно,  $\Delta U$  — амплитуда его модуляции,  $T_{\text{st}}$  — время установления,  $T_{\text{mod}}$  — период флуктуаций. Изменение напряжения вследствие эффекта Шоттки приводит к изменению тока электронного пучка

$$\tilde{I} = I \sqrt{\tilde{U}/U} \quad (2)$$

где  $\tilde{I}$  и  $I$  — текущее и среднее конечное значения соответственно. Также меняются (растут и осциллируют) энергия, питч-фактор электронов и расстройка по магнитному полю и напряжению.

Характерное время реальных флуктуаций (десятки и сотни микросекунд), как и время включения напряжения (порядка микросекунды) очень велики по сравнению с временами всех переходных процессов в гиротроне, составляющих от 1,5 нс для процессов установления колебаний в автономном гиротроне до 100 нс для процессов захвата фазы. Предполагаем, что частота внешнего сигнала лежит в центре полосы захвата, где время установления колебаний существенно меньше, чем на её краю. Поэтому можно ожидать, что режим генерации при фазовом захвате будет квазистационарным (в каждый момент времени будет происходить установление определённой амплитуды и фазы поля излучения), как если бы входные параметры электронного пучка были постоянными. С течением времени амплитуда и фаза поля излучения будут совершать медленные колебания, размах которых не зависит от периода модуляции параметров. Изменение фазы излучения приведёт к колебаниям его частоты с амплитудой, пропорциональной частоте модуляции параметров. В свободном гиротроне, наоборот, при заданных параметрах устанавливается определённая частота излучения. Поэтому при медленной модуляции параметров размах колебаний частоты излучения не зависит от периода модуляции, а амплитуда колебаний фазы пропорциональна периоду модуляции (при гармонической модуляции параметров).

При численном моделировании выбирались значения времени нарастания напряжения пучка и периода модуляции напряжения меньшие их реальных величин, но превышающие все характерные времена переходных процессов. Моделирование фазового захвата проводилось для периодов

осцилляций напряжения и тока от 300 до 600 нс. При моделировании режимов на краю зон захвата выбирались большие периоды модуляции, до 800 нс, т. к. там время установления колебаний увеличивалось.

Моделирование проводилось на основе уравнений, записанных в приближении фиксированной структуры поля [4, 5]:

$$\frac{dF_s}{dt} + \frac{\omega}{2Q_s} F_s + (\omega - \omega_0) F_s - i\delta_{s0} \frac{\omega}{Q_s} E = iI_s \tilde{c} \omega \int_0^{\zeta_{\text{ex}}} g^*(\zeta) \langle \langle p \rangle_{\vartheta} \exp(-i\Phi_s) \rangle_{\psi} d\zeta; \quad (3)$$

$$\frac{dp}{d\zeta} + i\tilde{a}(\tilde{\Delta} + |p|^2 - 1)p = i\tilde{b} \sum_s F_s g(\zeta) \exp(i\Phi_s). \quad (4)$$

Здесь  $F_s$  — безразмерная комплексная амплитуда моды с номером  $s$ ,  $E$  и  $\omega$  — безразмерная комплексная амплитуда и частота внешнего сигнала соответственно,  $Q_s$  — добротность  $s$ -й моды,  $\delta_s$  — символ Кронекера,  $\Phi_s = (\omega_s - \omega_0)t - (m_s - m_0)\Psi$  — фаза  $s$ -й моды относительно фазы рабочей моды (номер рабочей моды принят равным нулю),  $m_s$  — азимутальный индекс  $s$ -й моды,  $p$  — безразмерный поперечный импульс электрона, звёздочка обозначает комплексное сопряжение, угловые скобки — усреднение по указанному параметру. Опорные частоты мод  $\tilde{\omega}_s$  при усреднении уравнений возбуждения (3) по времени были выбраны различными, чтобы не только модули, но и фазы комплексных амплитуд мод менялись медленно за время пролёта электрона; расстройка между опорной частотой и собственной «холодной» частотой  $\omega_s$  для всех мод одинакова:  $\tilde{\omega}_s - \omega_s = \omega - \omega_0$ . На входе в пространство взаимодействия электроны равномерно распределены по фазам циклотронного вращения  $\vartheta$ :  $p(\zeta = 0) = \exp(i\vartheta)$ ,  $0 \leq \vartheta < 2\pi$ ,  $\zeta$  — безразмерная продольная координата,  $\psi$  — азимутальная координата,  $I_s$  — параметр тока для  $s$ -й моды,  $g(\zeta)$  — продольная структура поля, которая предполагается одинаковой для всех мод;  $\tilde{\Delta} = (2/\tilde{\beta}_{\perp 0}^2)(1 - \omega_{\text{H}0}/\tilde{\gamma}\omega)$  — безразмерная расстройка циклотронного резонанса,  $\omega_{\text{H}0}$  — нерелятивистская гирочастота,  $\tilde{\gamma}$  и  $\tilde{\beta}_{\perp 0}$  — значения масс фактора и безразмерной поперечной скорости электронов на входе в резонатор соответственно. Величины с тильдой  $\tilde{a}$ ,  $\tilde{b}$ ,  $\tilde{c}$ ,  $\tilde{\Delta}$ ,  $\tilde{\gamma}$  и  $\tilde{\beta}_{\perp 0}$  меняются в процессе включения напряжения, в конце процесса включения при наличии флуктуаций напряжения ( $\Delta U \neq 0$ ) эти величины колеблются около своих средних по времени значений  $\langle \tilde{a} \rangle_t = \langle \tilde{b} \rangle_t = \langle \tilde{c} \rangle_t = 1$ ,  $\langle \tilde{\gamma} \rangle_t = \gamma$ ,  $\langle \tilde{\beta}_{\perp 0} \rangle_t = \beta_{\perp 0}$ ,  $\langle \tilde{\Delta} \rangle_t = \tilde{\Delta}$ . Все безразмерные величины определены в работах [4, 5]. На каждом шаге моделирования параметры электронного пучка предполагались постоянными, поскольку время пролёта электронов через пространство взаимодействия (менее 1 нс) значительно меньше всех других характерных времён системы.

Численное моделирование проводилось для двух гиротронов, рассматривавшихся ранее в работах о фазовом захвате. Это созданный в ИПФ РАН гиротрон мегаваттного уровня мощности с частотой 170 ГГц и рабочей модой TE<sub>28,12</sub> [1] и гиротрон с вдвое более высокой частотой 345 ГГц и рабочей модой TE<sub>56,24</sub>, для которого в работе [2] было теоретически показано увеличение мощности излучения почти в два раза при фазовом захвате внешним монохроматическим сигналом. На основе развитого в работе [4] алгоритма для гиротрона на частоте 170 ГГц рассматривалось взаимодействие рабочей моды TE<sub>28,12</sub> с модами эквидистантного спектра TE<sub>26,12</sub>, TE<sub>27,12</sub>, TE<sub>28,12</sub>, TE<sub>29,12</sub>, TE<sub>30,12</sub> и модами неэквидистантного спектра TE<sub>-25,13</sub> и TE<sub>-26,13</sub> со встречным относительно рабочей моды направлением вращения полей. В гиротроне с частотой 345 ГГц рассматривалось взаимодействие рабочей моды TE<sub>56,24</sub> с модами эквидистантного спектра TE<sub>55,24</sub>, TE<sub>57,24</sub>, TE<sub>54,24</sub>, TE<sub>58,24</sub>, TE<sub>53,24</sub>, TE<sub>59,24</sub> и модами неэквидистантного спектра со встречным вращением полей TE<sub>-53,25</sub> и TE<sub>-54,25</sub>.

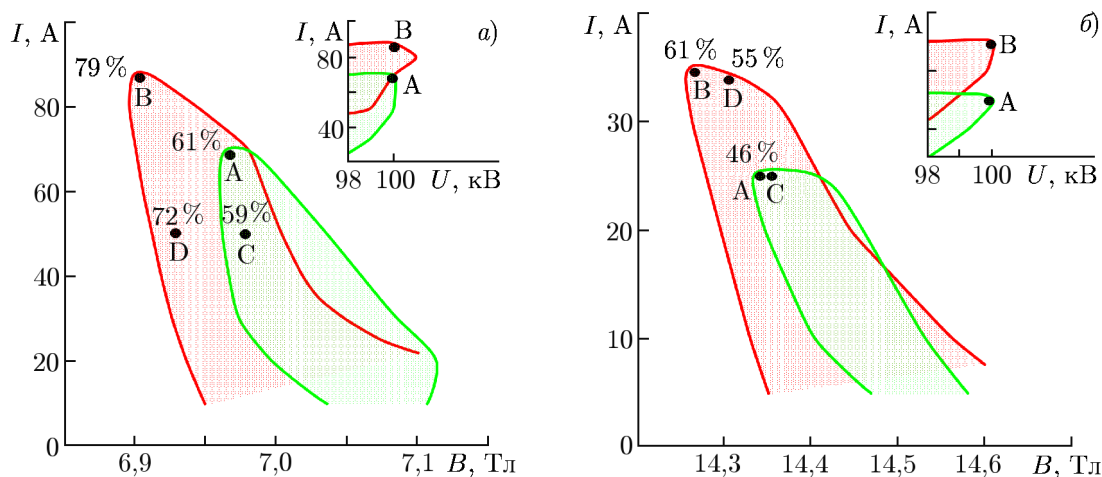


Рис. 1. Границы зон фазового захвата монохроматическим внешним сигналом (красные кривые) и зон одномодовой свободной генерации (зелёные кривые) на плоскости ток пучка—магнитное поле для гиротронов с частотой 170 ГГц (*a*) и 345 ГГц (*б*) при напряжении  $U = 100$  кВ и фрагменты верхних частей зон на плоскости ток пучка—ускоряющее напряжение. Для фрагментов зон на панели *a* в режиме свободной генерации ведущее магнитное поле  $B = 6,965$  Тл, в режиме захвата  $B = 6,901$  Тл, на панели *б* в свободном режиме  $B = 14,336$  Тл, в режиме захвата  $B = 14,261$  Тл. Максимальные значения КПД достигаются для гиротронов в свободном режиме генерации в точках А, для гиротронов в режиме захвата — в точках В. В точках С для свободных гиротронов и в точках D при фазовом захвате проводились расчёты, представленные на рис. 2, 3. В процентах указаны значения поперечного КПД в точках А, В, С, D

## 2. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 показаны границы зон одномодовой свободной генерации и зон захвата для двух гиротронов на плоскости параметров ток—ведущее магнитное поле при напряжении 100 кВ, а также фрагменты верхних частей зон на плоскости параметров ток—напряжение. Для каждого из гиротронов рассматривалось воздействие внешнего сигнала с уровнем мощности 4% от максимально достижимой мощности в автономном режиме генерации. Границы зон на плоскости ток—напряжение для гиротрона в свободном режиме и в режиме фазового захвата построены при разных значениях ведущего магнитного поля, указанных в подписи к рис. 1. Эти значения выбирались таким образом, чтобы максимальные значения поперечного КПД  $\eta_{\perp}$  (равного доле поперечной энергии электронов, переданной волне,  $\eta_{\perp} = 1 - \langle |p|^2 \rangle_{\vartheta, \psi} |_{\zeta = \zeta_{ex}}$ ) достигались при напряжении 100 кВ. Отстройка частоты сигнала  $f$  от собственной («холодной») частоты резонатора гиротрона  $f_0$  во всех расчётах составляла  $f - f_0 = -30$  МГц для гиротрона с частотой 170 ГГц и  $f - f_0 = -24$  МГц для гиротрона на частоте 345 ГГц, что соответствует середине полосы захвата. В соответствии с ранее полученными результатами [2, 4, 5], при захвате частоты в результате подавления внешним сигналом паразитных мод происходит смещение зон одномодовой генерации в область меньших магнитных полей и больших токов, где достигаются более высокие значения КПД (рис. 1).

Численное моделирование проводилось для значений параметров (тока, напряжения, магнитного поля), соответствующих области оптимальных КПД (точки С, D на рис. 1). При расчёте флуктуаций фазы и частоты излучения в режимах свободной генерации (рис. 2) и фазового захвата (рис. 3) значения параметров были выбраны таким образом, чтобы не происходило выхода из зон одномодовой генерации. Как показали расчёты, в режиме свободной генерации для обоих гиротронов при амплитуде колебаний напряжения  $\Delta U = 0,2$  кВ (такие колебания соответствуют

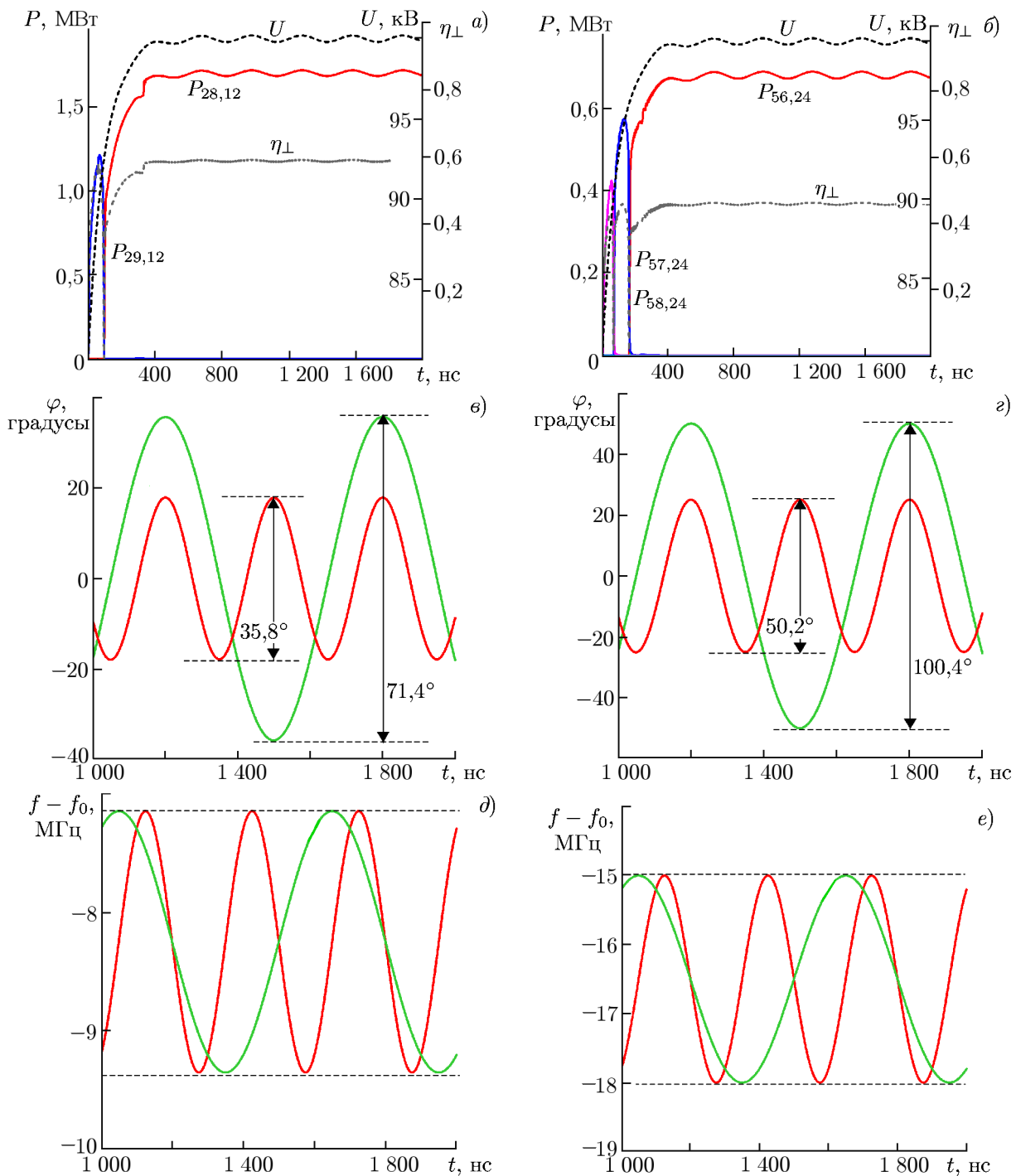


Рис. 2. Временные зависимости мощности излучения  $P$  на рабочей моде (цифрами указан индекс моды), поперечного КПД, напряжения ( $a, б$ ), фазы излучения ( $в, з$ ) и отстройки частоты излучения  $f$  от собственной частоты рабочей моды  $f_0$  ( $д, е$ ) в режиме свободной генерации при  $U = 100$  кВ,  $\Delta U = 0,2$  кВ. Параметры гиротронов соответствуют точкам С на рис. 1: для гиротрона с частотой 170 ГГц ( $a, в, д$ )  $I = 50$  А,  $B = 6,978$  Тл, с частотой 345 ГГц ( $б, з, е$ )  $I = 25$  А,  $B = 14,349$  Тл. На панелях ( $a, б$ ) период модуляции  $T_{mod} = 300$  нс, на панелях  $в-е$  два периода модуляции, 300 нс (красные кривые) и 600 нс (зелёные кривые)

реальным техническим флуктуациям [14]) происходит существенное изменение частоты и фазы поля излучения: при  $T_{\text{mod}} = 300$  нс фаза колеблется в интервале порядка нескольких десятков градусов, частота — в интервале нескольких мегагерц (рис. 2б–е). При воздействии внешнего сигнала в обоих гиротронах флуктуации частоты и фазы существенно уменьшаются по сравнению с режимом свободной генерации: фаза меняется в пределах нескольких градусов, частота — менее чем на 0,4 МГц (рис. 3б–е).

В свободном режиме при увеличении периода модуляции напряжения вдвое (до 600 нс) размах колебаний частоты не меняется, амплитуда колебаний фазы увеличивается вдвое (рис. 2б–е). В режиме захвата, наоборот, при увеличении периода модуляции амплитуда колебаний фазы не меняется, амплитуда колебаний частоты уменьшается вдвое (рис. 3б–е). Эти результаты согласуются с рассуждениями, приведёнными в разделе 1, а также с выполненными далее теоретическими оценками.

Если значения тока и напряжения расположены вблизи края полосы захвата и периодически выходят из зоны захвата, то может происходить возбуждение паразитных мод (рис. 4). Поскольку на краю полосы захвата время установления режимов генерации возрастает, распад на паразитные моды происходит только при периоде модуляции напряжения более 600 нс (рис. 4д, е). При

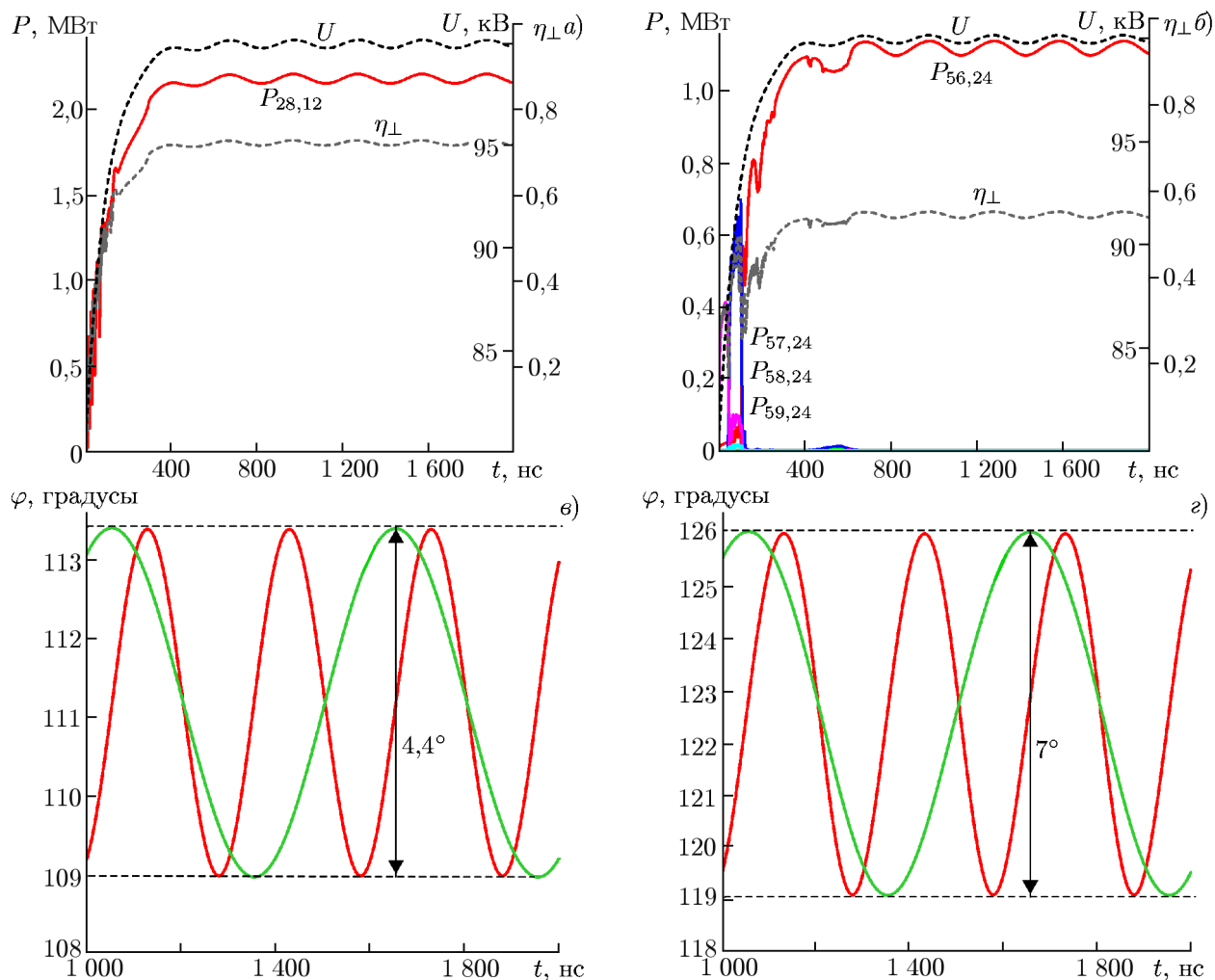


Рис. 3. (начало)

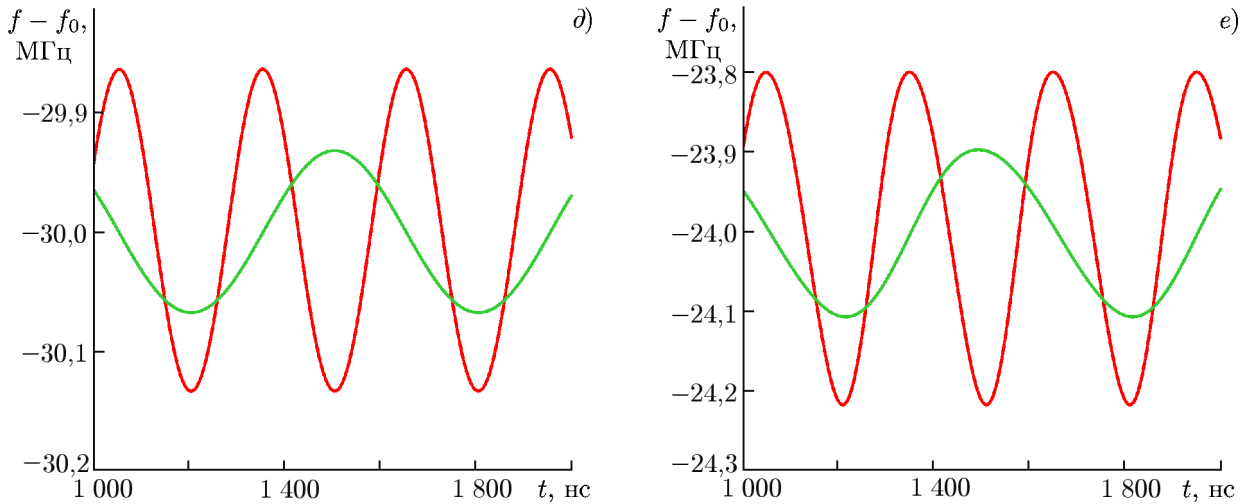


Рис. 3. (продолжение) Временные зависимости мощности излучения  $P$  на рабочей моде (цифрами указан индекс моды), поперечного КПД, напряжения ( $a, б$ ), фазы излучения ( $в, г$ ) и отстройки частоты излучения  $f$  от собственной частоты рабочей моды  $f_0$  ( $д, е$ ) в режиме фазового захвата при  $U = 100$  кВ,  $\Delta U = 0,2$  кВ. Параметры гиротронов соответствуют точкам D на рис. 1: в гиротроне с частотой 170 ГГц ( $a, в, д$ )  $I = 50$  А,  $B = 6,927$  Тл, в гиротроне с частотой 345 ГГц ( $б, г, е$ )  $I = 25$  А,  $B = 14,309$  Тл. На панелях  $a, б$  период модуляции  $T_{mod} = 300$  нс, на панелях  $в-е$  два периода модуляции 300 нс (красные кривые) и 600 нс (зелёные кривые)

меньших периодах распад не успевает произойти и наблюдаются биения частоты рабочей моды (рис. 4а-г).

При достаточно малой амплитуде внешнего сигнала и слабой модуляции параметров можно сопоставить полученные результаты с теоретическим подходом, развитым в работе [20, §9.2.3]. Из уравнения (3), представив комплексную амплитуду рабочей моды как  $F_0 = A \exp(i\varphi)$ , и без нарушения общности считая  $E$  действительной величиной, получим уравнения для модуля и фазы комплексной амплитуды:

$$\frac{dA}{dt} + \frac{\omega}{2Q_0} A - \frac{\omega}{Q_0} E \sin \varphi = -I_0 \omega A \chi_2; \tag{5}$$

$$\frac{d\varphi}{dt} + \omega - \omega_0 - \frac{\omega E}{Q_0 A} \cos \varphi = I_0 \omega \chi_1. \tag{6}$$

Здесь  $\chi_1 = \text{Re}\chi$ ,  $\chi_2 = \text{Im}\chi$  — реальная и мнимая части комплексной восприимчивости на рабочей моде  $\chi = (\tilde{c}/F_0) \int_0^{\zeta_{ex}} g^*(\zeta) \langle \langle p \rangle \rangle_{\psi} d\zeta$  соответственно. Рассмотрим стационарное состояние при захвате фазы и частоты, полагая напряжение постоянным. Считая сигнал малым, запишем  $A = \bar{A} + a$ ,  $|a| \ll \bar{A}$ ,  $\varphi = \varphi_0 = \text{const}$ , где  $\bar{A}$  — модуль амплитуды поля в стационарном состоянии при свободной генерации. Разложим в ряд величины  $\chi_{\beta}$ ,  $\beta = 1, 2$ :  $\chi_{\beta} = \bar{\chi}_{\beta} + a(\bar{\chi}_{\beta})'_A$  и линеаризуем (5), (6) по  $a$  (здесь  $\bar{\chi}'_{\beta}$  — значения в свободном режиме, штрих обозначает производную по переменной, указанной в нижнем индексе). В результате найдём отклонения модуля амплитуды от свободного значения:  $a = E \sin \varphi / [\bar{A} I_0 Q_0 (\bar{\chi}_2)'_A]$ . Подставляя это выражение в уравнение (6), найдём соотношение для фазы в режиме стационарной генерации:

$$\omega - \omega_0 - \frac{\omega E}{Q_0 \bar{A}} r \cos(\varphi_0 + \alpha) = I_0 \omega \bar{\chi}_1, \tag{7}$$

где  $r = \sqrt{1 + [(\bar{\chi}_1)'_A / (\bar{\chi}_2)'_A]^2}$ ,  $\alpha = \arctg[(\bar{\chi}_1)'_A / (\bar{\chi}_2)'_A]$ . В режиме свободной генерации уравнение (6) определяет сдвиг частоты относительно выбранной опорной частоты внешнего сигнала

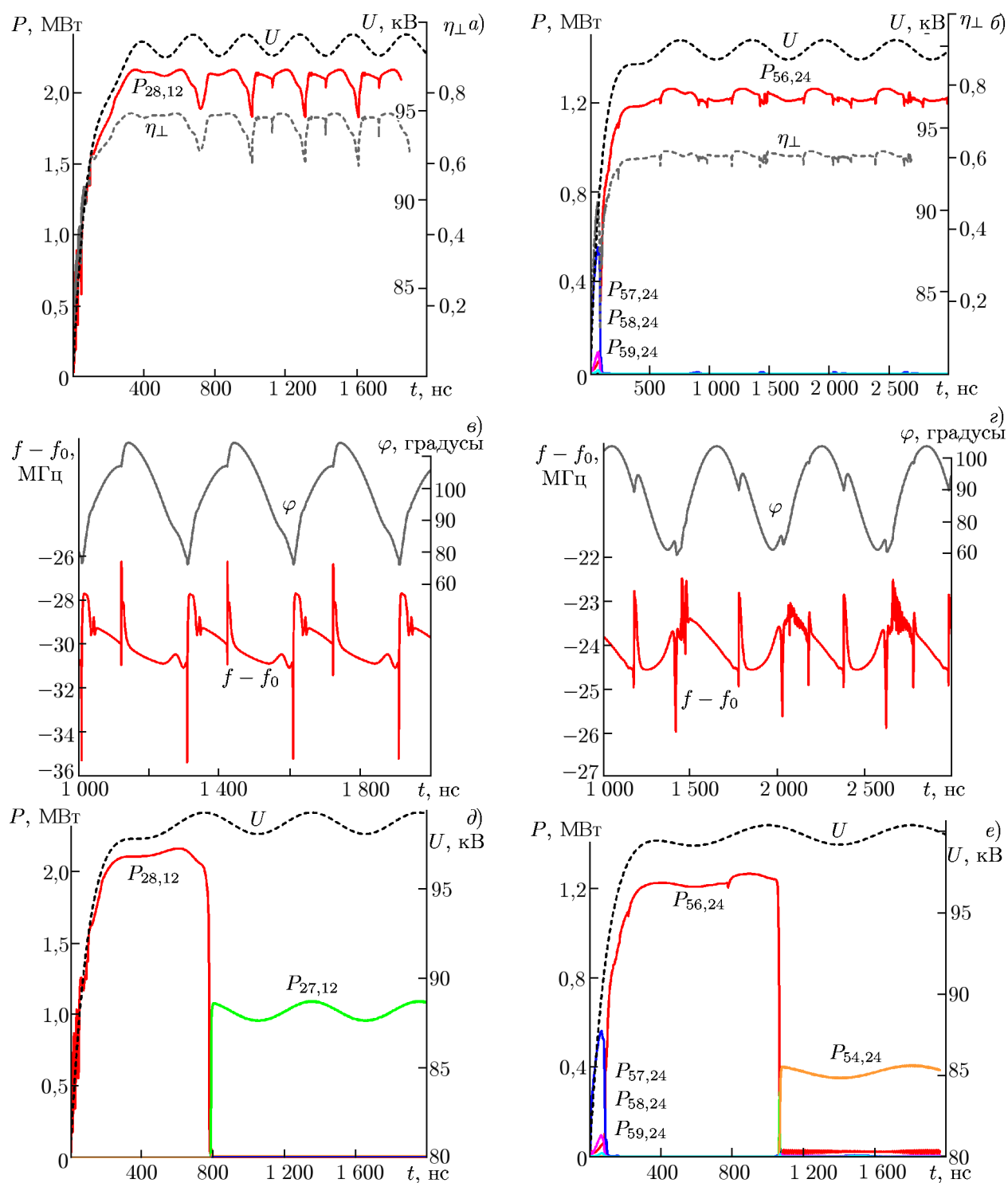


Рис. 4. Временные зависимости мощности излучения  $P$  на рабочей и паразитных модах ( $a, б, д, е$ , цифры соответствуют индексу мод), поперечного КПД ( $a, б$ ), напряжения ( $a, б, д, е$ ), фазы и отстройки частоты излучения ( $в, з$ ) при выходе из зоны захвата ( $\Delta U = 0,6$  кВ) для гиротронов с частотой 170 ГГц при  $I = 50$  А,  $U = 98,7$  кВ,  $B = 6,901$  Т ( $a, в, д$ ) и с частотой 345 ГГц при  $I = 34$  А,  $U = 99,8$  кВ,  $B = 14,261$  Тл ( $б, з, е$ ). На панелях  $a, в$   $T_{\text{mod}} = 300$  нс, на панели  $д$   $T_{\text{mod}} = 600$  нс, на панелях  $б, з$   $T_{\text{mod}} = 600$  нс, на панели  $е$   $T_{\text{mod}} = 800$  нс



$\omega$  (в отсутствие внешнего сигнала  $\omega$  — произвольная частота, близкая к собственной частоте резонатора  $\omega_0$ ):

$$\frac{d\varphi}{dt} = \Delta\omega = \omega_0 - \omega + I_0\omega\bar{\chi}_1. \quad (8)$$

Затем, пренебрегая изменениями амплитуды при вариации напряжения, но учитывая происходящие при этом вариации фазы  $\varphi = \varphi_0 + \tilde{\varphi}$ ,  $|\tilde{\varphi}| \ll 1$  и восприимчивости  $\chi_\beta = \bar{\chi}_\beta + a(\bar{\chi}_\beta)'_A + \Delta U \cos(\Omega t)(\bar{\chi}_\beta)'_U$ , получим уравнение для фазы, аналогичное приведённому в работе [20, формула (9.14)] модифицированному уравнению Адлера:

$$\frac{d\varphi}{dt} - \Delta\omega - \Delta_0 \cos(\varphi + \alpha) - I_0\omega(\bar{\chi}_1)'_U \Delta U \cos(\Omega t) = 0, \quad (9)$$

где  $\Delta_0 = Er\omega/(\bar{A}Q_0)$  — ширина полосы захвата (ср. с [9]). Линеаризуя (9) по  $\tilde{\varphi}$ , получим

$$\frac{d\tilde{\varphi}}{dt} + \Delta_0\tilde{\varphi} \sin(\varphi_0 + \alpha) - I_0\omega(\bar{\chi}_1)'_U \Delta U \cos(\Omega t) = 0. \quad (10)$$

Представляя решение (10) в виде  $\tilde{\varphi} = \Phi \cos(\Omega t + \beta)$ , найдём амплитуду колебаний фазы

$$\Phi = \frac{I_0\omega(\bar{\chi}_1)'_U \Delta U}{\sqrt{\Omega^2 + \Delta_0^2 - (\Delta\omega)^2}}. \quad (11)$$

В середине полосы захвата  $(\Delta\omega)^2 \ll \Delta_0^2$  при очень малой частоте модуляции напряжения  $\Omega^2 \ll \Delta_0^2$ , как следует из (11), флуктуации фазы равны

$$\Phi = \frac{I_0\omega(\bar{\chi}_1)'_U \Delta U}{\Delta_0}. \quad (12)$$

В свободном режиме генерации, решая уравнение (9) при  $\Delta_0 = 0$ , найдём  $\varphi = \Delta\omega t + \Phi_0 \sin(\Omega t)$ , где

$$\Phi_0 = \frac{I_0\omega(\bar{\chi}_1)'_U \Delta U}{\Omega}. \quad (13)$$

Подобный метод оценки флуктуаций фазы излучения гиротрона использовался в работе [34] при рассмотрении динамики фазы при скачке напряжения.

Таким образом, при достаточно большом периоде колебаний напряжения и малом отклонении частоты сигнала от середины полосы захвата уменьшение фазовых отклонений при захвате по сравнению с режимом свободной генерации можно характеризовать величиной

$$\Phi_0/\Phi = \Delta_0/\Omega. \quad (14)$$

Поскольку, как правило, величины  $|(\bar{\chi}_1)'_A|$  и  $|(\bar{\chi}_2)'_A|$  имеют один порядок, а  $r$  принимает значения порядка  $1 \div 2$ , из (14) получим следующие оценки: для гиротрона с частотой 170 ГГц:  $\Phi_0/\Phi \sim 8 \div 16$  ( $Q = 1300$ ), для гиротрона с частотой 345 ГГц  $\Phi_0/\Phi \sim 6 \div 12$  ( $Q = 3700$ ).

Хотя эти оценки примерно совпадают с результатами численных расчётов, они являются приближёнными. Это связано прежде всего с достаточно большим значением амплитуды внешнего сигнала ( $E/A \approx 0,2$ ). При такой величине внешнего сигнала восприимчивость может существенно меняться при захвате по сравнению с режимом свободной генерации и разложение  $\chi$  в ряд, представленное выше, становится недостаточно точным. Кроме того, приближение, основанное на анализе фазовой динамики с помощью уравнения Адлера и не учитывающее изменения амплитуды при фазовых флуктуациях, как правило, используется для генератора Ван-дер-Поля [20, 35],

где собственная частота колебаний не зависит от их амплитуды. В гиротроне «горячая» частота генерации сдвигается относительно собственной «холодной» частоты на величину  $I_0\omega\bar{\chi}_1$  (см. (8)), зависящую от амплитуды (поскольку  $\bar{\chi}_1$  зависит от амплитуды). Поэтому с помощью полученного соотношения (14) можно только качественно оценить уменьшение фазовых флуктуаций при захвате, а для точного расчёта отклонений фазы требуется численное моделирование.

## ВЫВОДЫ

Результаты моделирования показали, что в режиме захвата частоты и фазы рабочей моды гиротрона внешним монохроматическим сигналом флуктуации фазы и частоты излучения уменьшаются почти на порядок по сравнению с режимом автономной генерации (от  $35^\circ \div 50^\circ$  в свободном режиме генерации до  $4^\circ \div 7^\circ$  в режиме фазового захвата). Следует отметить, что в реальном эксперименте можно ожидать уменьшения размаха колебаний фазы при воздействии внешнего сигнала даже в большее число раз, чем показывают результаты численного моделирования, поскольку при расчётах период модуляции входных параметров электронного пучка был выбран меньше реального.

Таким образом, при воздействии достаточно слабого внешнего сигнала с уровнем мощности порядка десятков киловатт на гиротрон мегаваттного уровня мощности с рабочей модой высокого порядка флуктуации фазы не превышают нескольких градусов, что соответствует ограничениям, необходимым для создания в перспективе комплекса когерентно излучающих гиротронов.

Авторы выражают благодарность Н. М. Рыскину за полезные обсуждения и замечания. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант 19–79–30071).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chirkov A. V., Denisov G. G., Kuftin A. N. // Appl. Phys. Lett. 2015. V.106, No. 26. Art. no. 263501. <https://doi.org/10.1063/1.4923269>
2. Bakunin V. L., Denisov G. G., Novozhilova Yu. V. // IEEE Electr. Device Lett. 2020. V. 41, No. 5. P. 777–780. <https://doi.org/10.1109/LED.2020.2980218>
3. Бакунин В. Л., Гузнов Ю. М., Денисов Г. Г. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2019. Т. 62, № 7–8. С. 539–548.
4. Бакунин В. Л., Денисов Г. Г., Новожилова Ю. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 2015. Т. 58, № 12. С. 999–1011.
5. Бакунин В. Л., Денисов Г. Г., Новожилова Ю. В., Фокин А. П. // Изв. вузов. Радиофизика. 2016. Т. 59, № 8–9. С. 709–719.
6. Ginzburg N. S., Sergeev A. S., Zotova I. V. // Phys. Plasmas. 2015. V. 22, No. 3. Art. no. 033101. <https://doi.org/10.1063/1.4913672>
7. Бакунин В. Л., Денисов Г. Г., Новожилова Ю. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 2019. Т. 62, № 7–8. С. 549–565.
8. Novozhilova Y. V., Bakunin V. L., Preobrazhenskaya N. V., et al. // 44th Int. Conf. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves (IRMMW-THz 2019), 1–6 September 2019, Paris, France. Art. no. 8874116. <https://doi.org/10.1109/irmmw-thz.2019.8874116>
9. Ергаков В. С., Моисеев М. А., Хижняк В. И. // Радиотехника и электроника. 1978. Т. 23, № 12. С. 2591–2599.
10. Нусинович Г. С. // Радиотехника и электроника. 1977. Т. 22, № 10. С. 2214–2216.

11. McCurdy A. H., Armstrong C. M. // *Phys. Fluids B. Plasma Phys.* 1991. V. 3, No. 1. P. 212–227. <https://doi.org/10.1063/1.859939>
12. Jelonnek J., Schuenemann K. Study of gyrotron synchronization using an improved multi-mode time-domain analysis // 21st Int. Conf. Infrared and Millimeter Waves, 14–19 July 1996, Berlin, Germany. P. AM7-AM8.
13. Glyavin M., Zapevalov V., Idehara T., et al. // *Int. J. Infrared and Millimeter Waves.* 2003. V. 24, No. 4. P. 409–418. <https://doi.org/10.1023/A:1022403627410>
14. Fokin A., Glyavin M., Golubiatnikov G., et al. // *Sci. Reports.* 2018. V. 8, No. 1. P. 1–5. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-22772-1>
15. Taddia G., Pretelli M., Rinaldi L., et al. Main high voltage solid state gyrotron power supply 60kV/80A // *Procs. FEL 2006, 27 August–2 September 2006, Berlin, Germany.* P. 633–636.
16. Dumbrajs O., Nusinovich G. S. // *Phys. Plasmas.* 1997. V. 4, No. 5. P. 1413–1423. <https://doi.org/10.1063/1.872345>
17. Nusinovich G. S., Dumbrajs O. // *Phys. Plasmas.* 1997. V. 4, No. 5. P. 1424–1433. <https://doi.org/10.1063/1.872317>
18. Малахов А. Н. Флуктуации в автоколебательных системах. М. : Наука, 1968. 660 с.
19. Ланда П. С. Автоколебания в системах с конечным числом степеней свободы. М. : Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2010. 360 с.
20. Пиковский А., Розенблюм М., Куртс Ю. Синхронизация. Фундаментальное нелинейное явление. М. : Техносфера, 2003. 493 с.
21. Анищенко В. С., Астахов В. В., Вадивасова Т. Е. Регулярные и хаотические колебания. Синхронизация и влияние флуктуаций. Долгопрудный : Издательский Дом «Интеллект», 2009. 312 с.
22. Parkin K. L., Murakami D. D. // *Procs. 48th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propuls. Conf. Exhibit.* 30 July–1 August 2012, Atlanta, USA. P. 1–10. <https://doi.org/10.2514/6.2012-3741>
23. Komurasaki K., Tabata K. // *Int. J. Aerosp. Eng.* 2018. V. 2018. P. 1–9. <https://doi.org/10.1155/2018/9247429>
24. Thumm M., Franck J., Kalaria P. C., et al. // *Terahertz Sci. Technol.* 2015. V. 8, No. 3. P. 85–100. <https://doi.org/10.11906/TST.085-100.2015.09.09>
25. Kalaria P., Avramidis K. A., Franck J., et al. // *Procs. German Microw. Conf, 16–18 March 2015, Nuremberg, Germany.* P. 264–267. <https://doi.org/10.1109/GEMIC.2015.7107804>
26. Avramidis K. A., Aiello G., Alberti S., et al. // *Nuclear Fusion.* V. 59, No. 6. Art. no. 066014. <https://doi.org/10.1088/1741-4326/ab12f9>
27. Picard J. F., Schaub S. C., Rosenzweig G., et al. // *Appl. Phys. Lett.* 2019. V. 114, No. 16. Art. no. 164102. <https://doi.org/10.1063/1.5093639>
28. Othman M. A. K., Picard J., Schaub S., et al. // 44th Int. Conf. Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz). 1–6 September 2019, Paris, France. P. 1–2. <https://doi.org/10.1109/IRMMW-THz.2019.8874329>
29. Kutsaev S. V., Jacobson B., Smirnov A. Yu., et al. // *Phys. Rev. Appl.* 2019. V. 11, No. 3. Art. no. 034052. <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.11.034052>
30. Othman M. A. K., Picard J., Schaub S., et al. // *Appl. Phys. Lett.* 2020. V. 117, No. 7. Art. no. 073502. <https://doi.org/10.1063/5.0011397>
31. Zotova I. V., Denisov G. G., Ginzburg N. S., et al. // *Phys. Plasmas.* 2018. V. 25, No. 1. Art. no. 013104. <https://doi.org/10.1063/1.5008666>
32. Зотова И. В., Гинзбург Н. С., Денисов Г. Г. и др. // *Изв. вузов. Радиофизика* 2015. Т. 58, № 9. С. 759–769.
33. Богдашов А. А., Глявин М. Ю., Розенталь Р. М. и др. // *Письма в ЖТФ.* 2018. Т. 44, № 5.

- C. 87–94. <https://doi.org/10.21883/PJTF.2018.05.45712.17032>
34. Nusinovich G. S., Sinitsyn O. V., Granatstein V. L., Vlasov A. N. // AIP Conference Proceedings. 2006. V. 877, No. 1. P. 355–361. <https://doi.org/10.1063/1.2409156>
35. Кузнецов А. П., Кузнецов С. П., Рыскин Н. М. Нелинейные колебания. М. : Физматлит, 2002. 292 с.

Поступила в редакцию 23 июня 2020 г.; принята в печать 23 июля 2020 г.

**PHASE LOCKING BY AN EXTERNAL MONOCHROMATIC SIGNAL  
OF A GYROTRON WITH LOW-FREQUENCY VOLTAGE AND CURRENT  
FLUCTUATIONS**

*V. L. Bakunin, G. G. Denisov, and Yu. V. Novozhilova*

During the phase locking of the oscillations of a gyrotron with a megawatt power level by a relatively weak external monochromatic signal, the phase and radiation-frequency modulation, which is caused by the low-frequency fluctuations of the accelerating voltage and current, decreases several times compared with the autonomous regime. The calculations are performed using an example of two megawatt-level gyrotrons, namely, the gyrotron developed at the Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences operating at the  $TE_{28,12}$  mode with a frequency of 170 GHz [1] and a gyrotron with twice as high frequency and the operating-mode indices (345 GHz,  $TE_{56,24}$ ) whose ability of generation at the megawatt power level in the case of its frequency and phase locking by an external signal is shown theoretically [2].