

**ТУРБУЛЕНТНОСТЬ В ЭЛЕКТРОНИКЕ СВЕРХВЫСОКИХ ЧАСТОТ:
ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ**

Д. И. Трубецков^{1,2}, Ю. А. Калинин¹, А. В. Стародубов¹, А. С. Фокин¹

¹Национальный исследовательский
Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
Россия, 410012 Саратов, Астраханская, 83

²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Россия, 115409 Москва, Каширское шоссе, 31

E-mail: dtrubetskov@yahoo.com; noios@sgu.ru
StarodubovAV@gmail.com; alexander1989fokin@mail.ru

Представлен обзор современного состояния различных теоретических подходов к описанию турбулентности в электронных потоках и электронных приборах сверхвысоких частот (СВЧ). Выделены и рассмотрены три вида турбулентных (неламинарных) электронных потоков. Первый вид обусловлен пересечением электронных траекторий (например, за счет тепловых скоростей) и присущ всем электронным потокам. Турбулентность второго вида возникает благодаря неустойчивости электронных потоков, из-за которой малые возмущения нарастают экспоненциально (к таким неустойчивостям относятся диокотронная и slipping-неустойчивость). Третий вид – вихревая турбулентность, начало которой кладёт филаментаризация потока. Образующиеся заряженные нити взаимодействуют между собой, что приводит к образованию вихревых структур; присутствие последних повышает число коллективных степеней свободы и может привести к турбулентности. Изложены результаты экспериментального исследования турбулентных электронных потоков и генераторов с их использованием в автономном режиме и при подаче внешнего сигнала. Исследованы различные типы широкополосных генераторов СВЧ-колебаний. Обсуждаются феноменологические модели турбулентного электронного потока, представляющие собой цепочки из сверхизлучающих сгустков, содержащих электроны-осцилляторы, цепочки «вихрей», которые описываются модифицированными уравнениями ван дер Поля.

Ключевые слова: Электронный поток, турбулентность, неустойчивость, вихрь, генератор, широкополосная СВЧ-генерация.

DOI: 10.18500/0869-6632-2016-24-5-4-36

Ссылка на статью: Трубецков Д.И., Калинин Ю.А., Стародубов А.В., Фокин А.С.
Турбулентность в электронике сверхвысоких частот: Теоретические подходы и

результаты экспериментов // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2016. Т. 24, No 5. С. 4–36.

TURBULENCE IN MICROWAVE ELECTRONICS:
THEORETICAL APPROACHES AND EXPERIMENTAL RESULTS

D. I. Trubetskov^{1,2}, Yu. A. Kalinin¹, A. V. Starodubov¹, A. S. Fokin¹

¹National Research Saratov State University
Astrahanskaya, 83, 410012 Saratov, Russia
²National Research Nuclear University «MEPhI»
Kashirskoe shosse, 31, 115409 Moscow, Russia

E-mail: dtrubetskov@yahoo.com; noios@sgu.ru;
StarodubovAV@gmail.com; alexander1989fokin@mail.ru

A review of the current state of different theoretical approaches to the description of turbulence in electron beams and electronic devices at microwave frequencies is shown. A three types of turbulent (nonlaminar) electron beams were considered. The first type of turbulent electron beam is caused by the intersection of electronic trajectories (e.g., due to thermal velocity) and it is common to the flow of electrons at all. The turbulence of the second type is due to the instability of the electron beams, because of which a small perturbations grow for an exponentially (such instabilities include diocotron and slipping-instability). The third type –vortex turbulence, the cause of which is filamentarization of electron flow. Formed charged filaments interact among themselves, that leads to the formation of vortex structures; the presence of this structures increases the number of collective degrees of freedom and may lead to turbulence. The results of an experimental study of turbulent flows and electronic generators with their use in standalone mode and when an external signal were shown. Various types of broadband broadband microwave oscillators oscillations were investigated. We discuss the phenomenological model of turbulent the electron beam, which is a chain of superradiant clots containing electron-oscillators, chain of «vortices» («vortices» are describes by the modified equations of van der Pol).

Keywords: electron flow, turbulence, instability, vortex, generator, broadband microwave generation

DOI: 10.18500/0869-6632-2016-24-5-4-36

Paper reference: Трубецков Д.И., Калинин Ю.А., Стародубов А.В., Фокин А.С.
Турбулентность в электронике сверхвысоких частот: Теоретические подходы и
результаты экспериментов // *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*. 2016. Vol. 24.
Issue 5. P. 4–36.