

Вихревые электронные потоки в магнитно-изолированных передающих линиях мегаамперных импульсных генераторов с низкоомными нагрузками: численное моделирование

*А.А. Жерлицын, И.В. Пегель**

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия

**pegel@lfe.hcei.tsc.ru*

В расчетах с помощью электромагнитного PiC-кода KARAT продемонстрирован вихревой характер электронных потоков в магнитно-изолированном выходном тракте субнаносекундного мегаамперного импульсного генератора с индуктивной нагрузкой. Показано, что образование вихрей не приводит к существенным потерям энергии. Вихревые потоки могут достигать разделительного изолятора вода–вакуум, создавая угрозу его электрической прочности. При срабатывании в тракте замыкающего ключа потоки электронов из области правее него перехватываются. Электронные вихри являются источником субгигагерцовых колебаний напряжения в тракте, которым способствуют резонансные свойства тракта. Эмиссия ионов приводит к постепенному размыванию вихревых структур.

Ключевые слова: мегаамперный импульсный генератор, взрывная электронная эмиссия, магнитная самоизоляция, вихревой электронный поток, плазменный замыкающий ключ, высокочастотные колебания

1. Введение

Выходные электрические тракты мегаамперных импульсных генераторов обычно представляют собой вакуумные передающие линии. Электрические поля в таких линиях, как правило, достаточны для развития взрывной электронной эмиссии. Однако в случае низкоомных нагрузок (например, лайнерного типа) линии большую часть времени находятся в режиме магнитной самоизоляции по отношению к электронным потокам. Последние в первом приближении рассматривают как квазиплоские ламинарные бриллюэновские потоки, стелющиеся вдоль отрицательного проводника линии по направлению к нагрузке. Теоретические модели, соответствующие такому упрощенному представлению, хорошо разработаны. Вместе с тем, численные эксперименты, выполняемые с 1990-х годов, показывают (см., например, [1]–[4]), что электронные потоки в магнитно-изолированных линиях имеют тенденцию утрачивать ламинарность и приобретать вихревую структуру.

Цель работы состояла в том, чтобы в численном моделировании выходного вакуумного тракта субнаносекундного импульсного генератора определить характер электронных потоков и выяснить, какие последствия может вызывать вихреобразование в них.

2. Условия численного эксперимента

Расчеты выполнялись с помощью электромагнитного PiC-кода KARAT [5] в осесимметричной версии, а в отдельном случае – в трёхмерной декартовой версии.

Моделируемая конфигурация высоковольтного тракта (рис. 1) включала коаксиальный фидер с водяной изоляцией, секционированный разделительный изолятор, цилиндрическую и коническую вакуумные передающие линии и индуктивную нагрузку. В начале цилиндрического участка линии мог размещаться замыкающий ключ, моделируемый проводящей средой с сопротивлением в замкнутом состоянии ≈ 0.2 мОм (на практике – плазменный ключ). Тракт запитывался колоколообразным импульсом с длительностью по основанию ≈ 0.5 мкс такой амплитуды, чтобы результирующее напряжение на входе тракта достигало 1 МВ, а ток – 1 МА. На проводниках линий задавалась эмиссия электронов с плотностью тока, достаточной для ограничения объемным зарядом (полный ток эмиссии от

1 МА и более), а в ряде случаев и эмиссия ионов Fe⁺ с соответствующей плотностью тока. Расчеты выполнены при числе разбиений пространственной сетки $N_r = 620$, $N_z = 2215$.

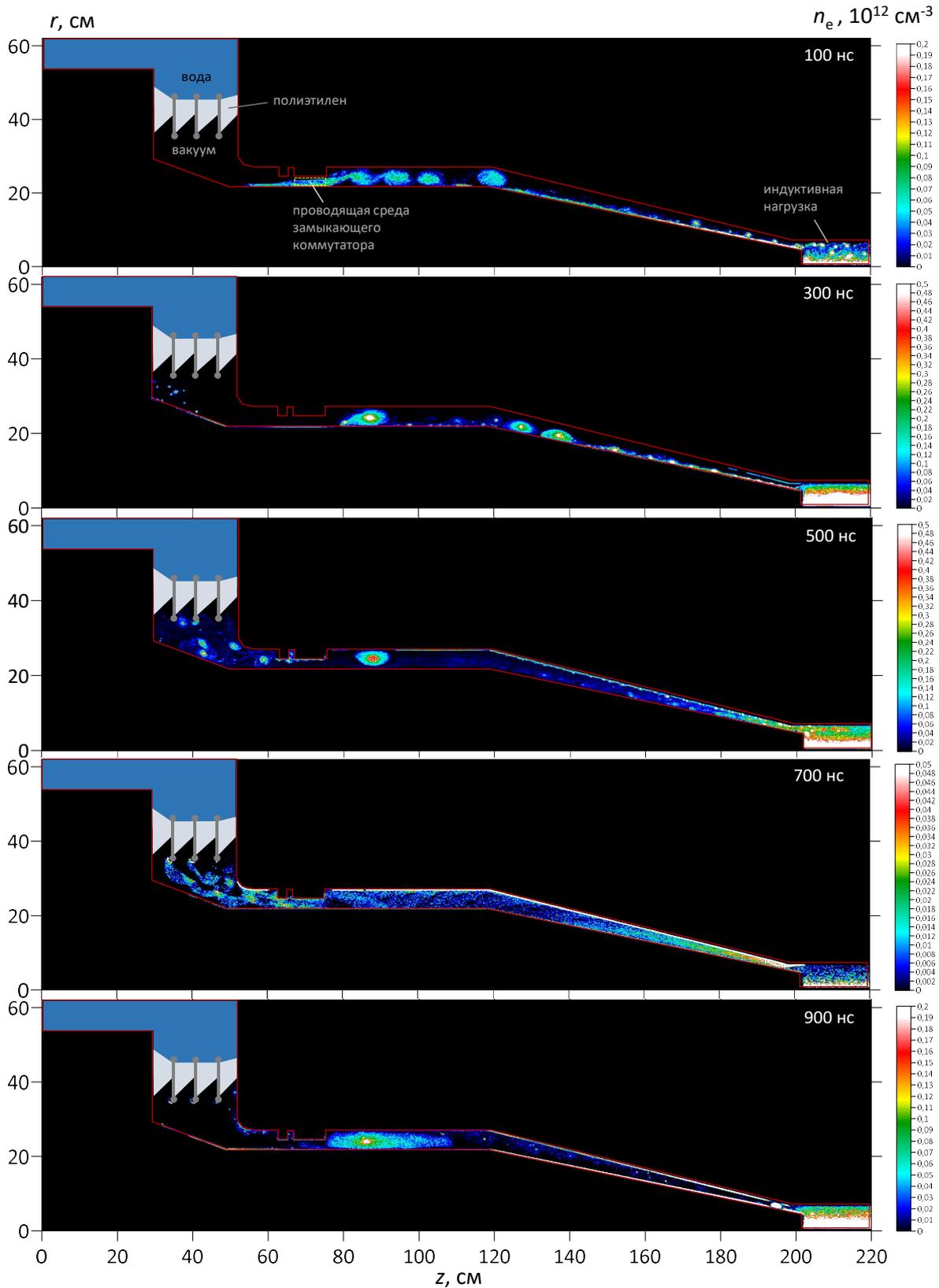


Рис. 1. Электронные вихри в выходном вакуумном тракте импульсного генератора с индуктивной нагрузкой в различные моменты времени; n_e – концентрация электронов.

3. Результаты моделирования. Свойства и поведение электронных вихрей

Расчеты подтвердили, что рассматриваемой системе магнитноизолированные электронные потоки, проходя возле неоднородностей тракта, теряют ламинарность, приобретают вихревой характер и могут заполнять поперечное сечение тракта (рис. 1). Возникают как уединенные тороидальные электронные вихри, так и их последовательности.

Электронные вихревые кольца могут нести заряд от единиц до десятков микрокулон. В цилиндрической части тракта толщина кольца обычно составляет 1–2 см, но может приближаться к величине зазора между проводниками. Концентрация электронов в таких кольцах не превышает 10^{12} см⁻³. Встречаются кольца, однородные по плотности, и кольца, состоящие из гало и более плотного ядра (рис. 2). В конической части линии толщина колец уменьшается с сужением линии, а концентрация электронов в них возрастает, достигая 10^{14} см⁻³ в области индуктивной нагрузки (рис. 3). Электронная плазменная частота в кольцах составляет от единиц до десятков гигагерц. Частота углового вращения частиц в вихрях также лежит в гигагерцовом диапазоне. Наблюдаются как вихри, вращающиеся как жесткий ротатор, так и вихри с зависимостью угловой скорости частиц от радиуса.

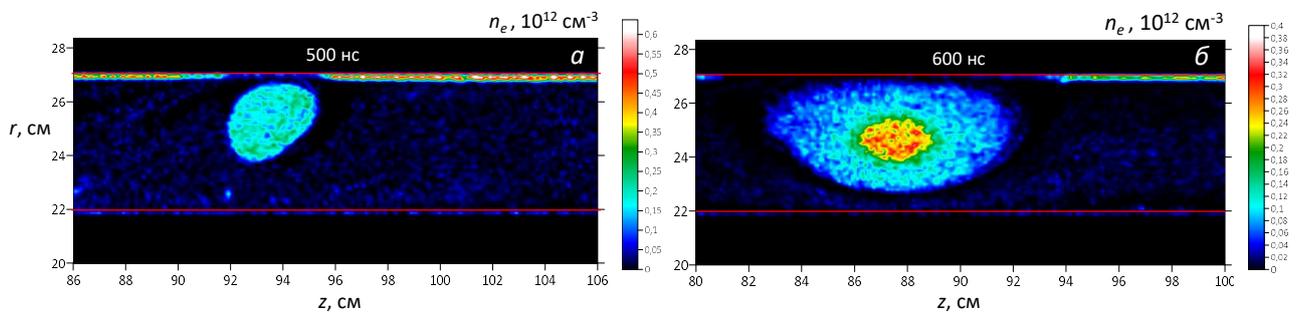


Рис. 2. Электронное вихревое кольцо с однородной плотностью (а) и кольцо с гало и более плотным ядром (б) в цилиндрической части линии.

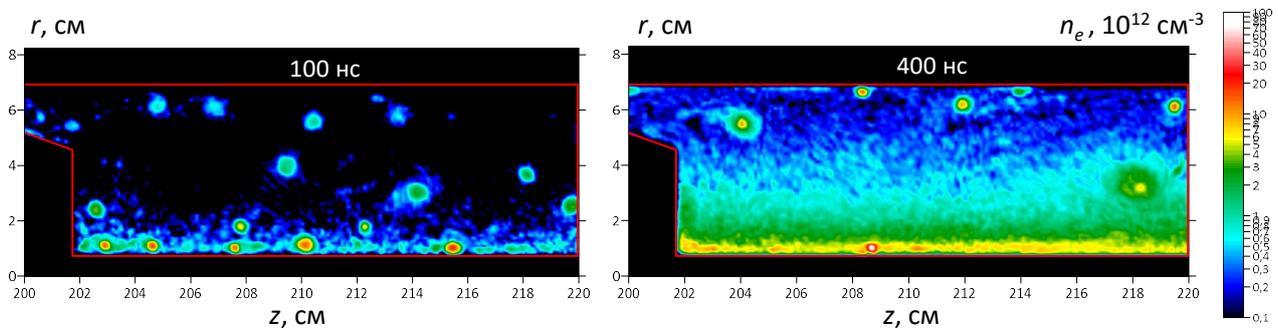


Рис. 3. Электронные вихри в области индуктивной нагрузки.

Вихри движутся со скоростью до 10^9 см/с обычно в направлении нагрузки на стадии нарастания тока и от нагрузки при спадании тока, не осаждаясь на стенки и не нарушая магнитной изоляции. Поведение вихрей разнообразно. Встречая на пути неоднородности волнового сопротивления тракта, вихри могут останавливаться или отражаться. Наблюдается прохождение вихрей друг через друга, их взаимное орбитальное движение, встречное движение вихря через квазиламинарный электронный поток, распад вихря на более мелкие, образование групп. На рис. 1 (моменты времени 300 нс и 500 нс) видны группы вихрей, циркулирующих в расширении вакуумной линии вблизи разделительного изолятора.

Электронные вихревые кольца создают вокруг себя электрическое поле в сотни киловольт на сантиметр (рис. 4а), превышающее поле рабочего импульса, и при прохождении по высоковольтному тракту генерируют интенсивные наносекундные всплески

поля на его поверхности. Регистрация таких всплесков в эксперименте может послужить индикатором существования вихревых колец. Вихри обладают диамагнетизмом в единицы процентов при напряжениях на входе тракта до 1 МВ (рис. 4б) и в десятки процентов при мультимегавольтных напряжениях.

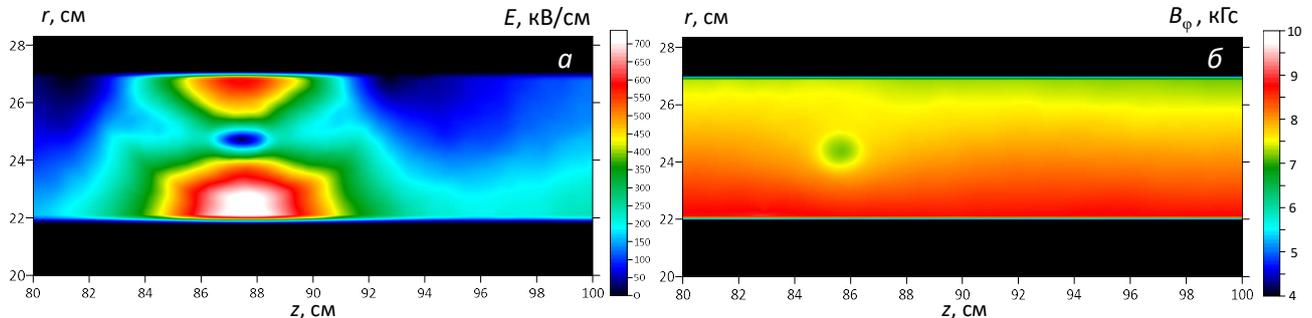


Рис. 4. Примеры распределения модуля электрического поля (а) и азимутального магнитного поля (б) в области электронного вихревого кольца.

При введении эмиссии с проводников тракта ионов Fe^+ с током, ограниченным объемным зарядом, вихревая структура электронных потоков за доли микросекунды, по мере накопления ионов, сменяется более равномерным распределением частиц (рис. 5).

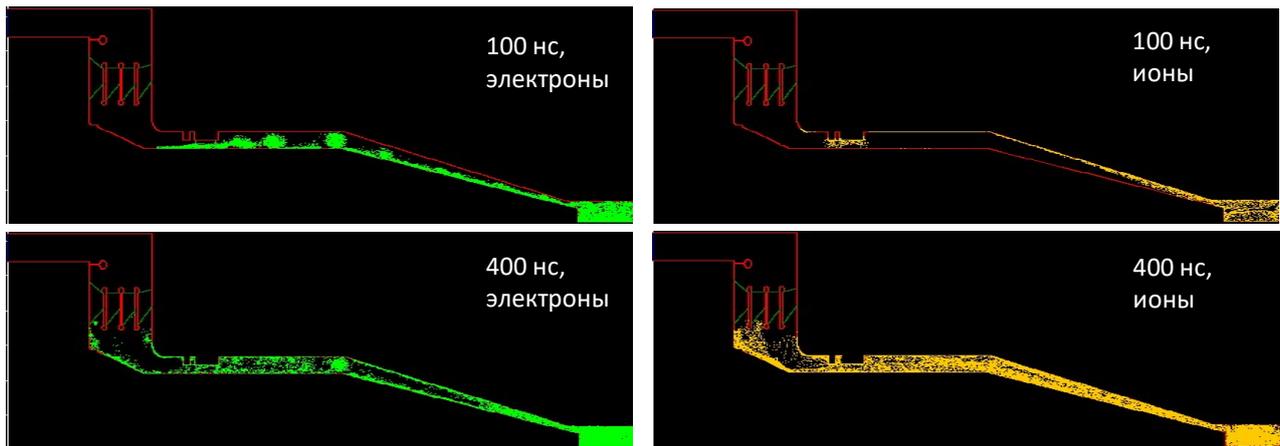


Рис. 5. Конфигурации электронов и ионов Fe^+ в различные моменты времени.

4. Нежелательные явления, связанные с вихревыми электронными потоками

Расчеты показали, что мощность потерь энергии, связанных с электронной бомбардировкой стенок тракта, мала по сравнению с электрической мощностью импульса (до 1 ТВт) и не превышает 30 ГВт даже при накоплении в тракте ионов (без них – примерно вдвое меньше). Таким образом, качество магнитной изоляции остается высоким, несмотря на вихревой характер электронных потоков. Вместе с тем, образование электронных вихрей приводит к другим негативным последствиям.

Во-первых, вихревые электронные кольца, на стадии спада тока интенсивно выбрасываемые из объема вакуумных линий и нагрузки в отрицательном направлении, могут достигать разделительного изолятора, принося на его поверхность ток, достигающий 10^4 А. Это создает угрозу электрической прочности изолятора. Установка экранов на градиентных кольцах изолятора не устраняет проблемы, поскольку вихревые кольца огибают эти экраны. Уменьшить поток электронов на изолятор позволяет использование замыкающего ключа,

расположенного в начале цилиндрической линии. При замыкании ключа электронные потоки, исходящие из правее расположенной области, эффективно перехватываются (рис. 6а). Поток ионов не перехватывается (поскольку они не замагничены) и достигает изолятора. Также мало изменяется поток на изолятор тех электронов, которые эмитированы с поверхностей левее замыкающего ключа.

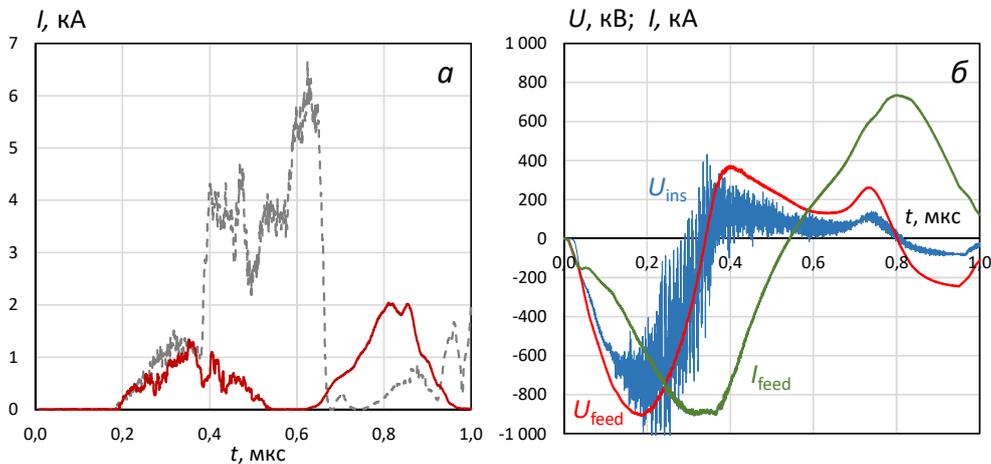


Рис. 6. Токи и напряжения при срабатывании замыкающего ключа в момент времени 350 нс. Слева (а): ток в сечении ниже вакуумной границы изолятора (штриховой линией показан ток без срабатывания ключа). Справа (б): напряжение в фидере (U_{feed}) и вблизи вакуумной границы изолятора (U_{ins}), ток в фидере (I_{feed}). Эмиссия электронов со всех металлических поверхностей вакуумной части тракта, порог эмиссии 100 кВ/см.

Во-вторых, высокочастотные токи, создаваемые движущимися электронными вихрями, являются источником возникающих в тракте колебаний напряжения, которые в рассматриваемых условиях происходят на частоте около 110 МГц (длина волны $\lambda \approx 270$ см) и ее гармониках. Размах колебаний напряжения с вакуумной стороны изолятора достигает десятков процентов (кривая U_{ins} на рис. 6б), что может способствовать его пробое. Осцилляции возникают еще до стадии спада тока, когда обратные потоки электронов еще не появились, и даже тогда, когда эти потоки перехвачены замыкающим ключом.

Возбуждение колебаний, по-видимому, облегчается резонансными свойствами неоднородного тракта. Величина $\lambda/2 \approx 135$ см близка к длине низкоомной ($\rho \sim 10$ Ом) части тракта (цилиндрическая и коническая линии), заключенной между сравнительно высокоомными участками: расширением под изолятор (волновое сопротивление дисковой линии ≈ 40 Ом на радиусе 30 см) и индуктивной нагрузкой (90 нГн, модуль импеданса на указанной частоте 62 Ом). Оценка добротности получающегося «полуволнового резонатора» дает величину $Q \approx 9$ на основной частоте 110 МГц и $Q \approx 18$ на второй гармонике. Ток факт, что в фидере, имеющем водяное заполнение, колебания незаметны (кривая U_{feed} на рис. 6б), можно объяснить отражением высокочастотной электромагнитной волны от границы воды, имеющей высокую диэлектрическую проницаемость.

5. Предварительный трехмерный расчет

Для оценки того, насколько подвержена азимутальным возмущениям кольцевая структура электронных вихрей, наблюдаемая в осесимметричном моделировании, было выполнено трехмерное моделирование простейшей конфигурации радиальной (дисковой) линии с индуктивной стержневой нагрузкой, запитываемой мегаамперным током. Расчет выполнен в декартовой (XYZ) версии кода КАРАТ на сравнительно грубой пространственной сетке ($N_x = N_y = 200$). На рис. 7 приведено распределение компоненты электрического поля E_z (нормальной к проводникам линии) вблизи отрицательного

проводника, по которому можно судить о распределении плотности электронов. Видно, что формируется структура из разорванных кольцевых фрагментов, однако в целом картина сохраняет concentricity. Для ответа на вопрос, в какой мере такое отклонение от осевой симметрии вызвано физическими причинами и насколько – погрешностью моделирования, требуются трехмерный анализ устойчивости вихревых колец и расчеты с более высоким пространственным разрешением.

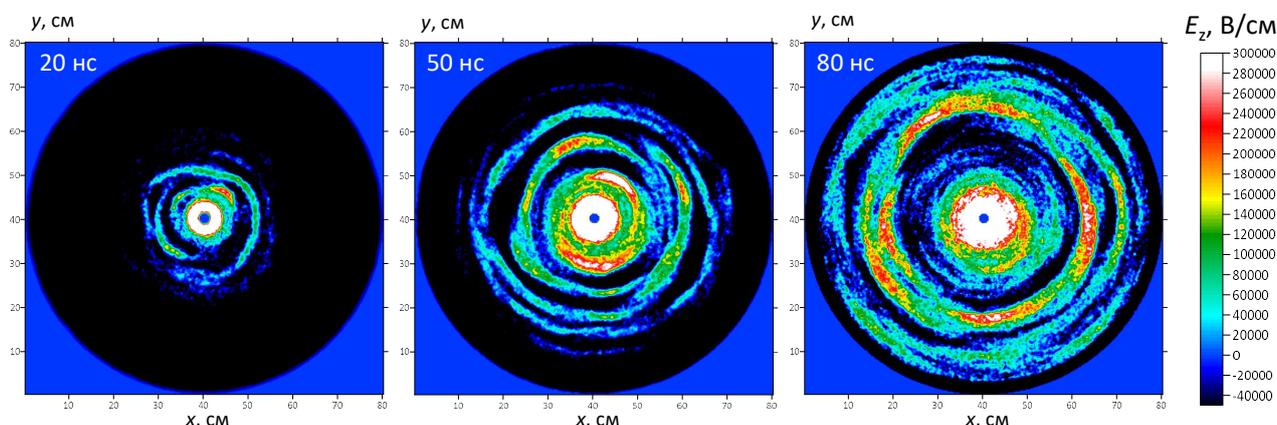


Рис. 7. Нормальная компонента электрического поля вблизи поверхности отрицательного проводника дисковой линии с индуктивной нагрузкой и эмиссией электронов.

6. Заключение

Описанные модельные результаты получены в ситуации, когда в высоковольтном тракте присутствуют лишь потоки электронов и ионов, но не плотная плазма, взрывоэмиссионная и коллекторная, являющаяся источником этих частиц. Численное моделирование динамики такой плазмы в мощных импульсных генераторах является актуальной задачей и уже представлено в публикациях (см., например, [6]). Также представляет интерес исследование структуры электронных потоков в трактах более сложной формы, чем осесимметричная.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России по теме FWRM-2021-0001.

7. Литература

- [1] B.W. Church, R.N. Sudan, A self-consistent quasistatic equilibrium for non-neutral diamagnetic electron vortices, *Phys. Plasmas*, **2**, 1837, 1995.
- [2] T.D. Pointon, M.E. Savage, 2-D PIC simulations of electron flow in the magnetically insulated transmission lines of Z and ZR, *2005 IEEE Pulsed Power Conference*, IEEE, Piscataway, NJ, 151, 2005.
- [3] J.G. Leopold, R. Gad, I. Navon, Flow dynamics along complex magnetically insulated transmission lines, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **40**, 7, 1878, 2012.
- [4] D.V. Rose, et al., Numerical simulations of enhanced ion current losses in the inner magnetically insulated transmission line of the Z accelerator, *Phys. Rev. Accel. Beams*, **23**, 080401, 2020.
- [5] В.П. Тараканов, Универсальный электромагнитный код КАРАТ, в кн.: *Математическое моделирование. Проблемы и результаты*. М.: Наука, 2003.
- [6] N. Bennett, et al., Magnetized particle transport in multi-MA accelerators, *Phys. Rev. Accel. Beams*, **24**, 060401, 2021.