

УДК 621.396.6

# ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ НЕЛИНЕЙНЫХ НЕКОНВЕРГЕНТНЫХ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

**А. И. Лучанинов**

Доктор физико-математических наук, профессор\*  
Контактный тел.: (057) 702-14-30  
E-mail: luchan@kharkov.ua

**Д. С. Гавва**

Кандидат технических наук, доцент\*  
Контактный тел.: (057) 702-14-30  
E-mail: GavvaDS@gmail.com

**Е. В. Крикун**

Кандидат технических наук, ассистент\*  
Контактный тел.: (057) 702-14-30  
E-mail: elena-krikyn@rambler.ru

**Ю. В. Вишнякова**

Аспирант\*  
Контактный тел.: (057) 702-14-30  
E-mail: juvalort@gmail.com

**В. А. Назаренко**

Кандидат технических наук, доцент  
\*Кафедра основ радиотехники  
Харьковский национальный университет радиоэлектроники  
пр. Ленина, 14, г. Харьков, Украина, 61166.  
Контактный тел.: (057) 702-14-30  
E-mail: nva11@rambler.ru

*Розглянуто результати моделювання неконвергентних пристроїв. Наведено результати досліджень для мікροстрічкової лінії передачі. Показано, що у режимі сильної нелінійності присутні ознаки режиму динамічного хаосу*

*Ключові слова: нелінійність, конвергентність, динамічний хаос*

*Рассмотрены результаты моделирования неконвергентных устройств. Приведены результаты исследования для микрополосковой линии передачи. Показано, что в режиме сильной нелинейности присутствуют явные признаки режима динамического хаоса*

*Ключевые слова: нелинейность, конвергентность, динамический хаос*

*The work examines simulation results for non-convergent devices. Investigation results for a microstrip transmission line are represented. It is demonstrated that explicit attributes of the dynamic chaos regime are observed in the strong nonlinearity mode*

*Keywords: nonlinearity, convergency, dynamic chaos*

## 1. Введение

Исследование различных нелинейных электродинамических устройств является актуальной задачей, решению которой посвящен целый ряд работ. В том числе это связано с тем, что наличие нелинейных элементов в структуре электродинамических устройств позволяет существенно улучшить характеристики микроволновой системы в целом, достичь многофункциональности в рамках отдельного устройства. В частности с этой точки зрения, особый интерес представляет анализ нелинейных эффектов, возникающих в микроволновых устройствах выполненных на основе высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП), а

также устройствах, в структуру которых включены различные нелинейные управляющие элементы.

Известно, что в линейных электрических цепях установившийся режим не зависит от начальных условий в цепи. Что же касается нелинейных цепей, то изменение начальных условий в них может привести не только к количественным, но и качественным изменениям режима цепи (к изменению частоты колебаний, потере устойчивости и т. д.). В связи с этим важной задачей является выделение возможно более широкого класса нелинейных цепей, обладающих свойством нечувствительности к начальным условиям, которые будут работать достаточно надежно, не изменяя своего установившегося режима под влиянием

янием возможных флуктуации и кратковременных толчков напряжения или тока. Цепи, обладающие описанным свойством, согласно [1] называются конвергентными.

Как и в работе [2] для нелинейных цепей, возбуждаемых внешними периодическими источниками ЭДС будем рассматривать конвергентность в более узком смысле [3]. Под конвергентной будем понимать такую систему, у которой при наличии периодических (с периодом  $T$ ) внешних источников установившаяся реакция также является периодической (с тем же периодом  $T$ ) и не зависящей от начальных условий.

## 2. Численные исследования свойств конвергентности электродинамических устройств

Блок-схема одной из возможных реализаций алгоритма моделирования нелинейных устройств показана на рис. 1. Она позволяет реализовать достаточно универсальный алгоритм моделирования исследуемого класса нелинейных устройств и использовать для этого на различных этапах вычислений модули разработанных пакетов моделирования. В данной работе на этапе определения параметров линейного оператора были использованы пакеты Microwave Office (модуль EMSight), Wire, а на этапе решения уравнений гармонического баланса пакеты Microwave Office (модуль Schematics), Vega (пакеты Wire и Vega разработаны на кафедре ОРТ ХНУРЭ).

В схеме выделены две ветви вычислений. Одна из них соответствует вычислению параметров линейной подсхемы (матрица  $\tilde{Z}_{11}^{(aa)}(v_i)$ ), а вторая – параметров

нелинейной подсхемы (параметров оператора  $\mathfrak{S}_i\{\tilde{\mathbf{K}}^{(\omega)}[\mathbf{j}(\mathbf{r},t)]\}$ ). Эти параметры являются исходными

для решения уравнений гармонического баланса, результатом которого является вектор  $\mathbf{J}_1^{(\omega)}(v_i)$ , опреде-

ляющий распределение плотности тока на основной частоте, а также на комбинационных частотах и частотах высших гармоник. От корректности вычисления  $\tilde{Z}_{11}^{(aa)}(v_i)$  и  $\mathfrak{S}_i\{\tilde{\mathbf{K}}^{(\omega)}[\mathbf{j}(\mathbf{r},t)]\}$  в значительной мере зависит

корректность результатов моделирования всего устройства. Особенно это важно при моделировании устройств со слабой нелинейностью.

Для определения  $\tilde{Z}_{11}^{(aa)}(v_i)$  необходимо вычисление

обобщенной матрицы собственных и взаимных импедансов  $Z(V_i)$  для структуры, соответствующей моделируемой, но выполненной из проводников с идеальной проводимостью. Этот этап реализуется с использованием модулей электродинамического моделирования.

Результат вычисления этих модулей оформляется в виде файлов данных, которые являются исходными данными для модуля схемотехнического анализа, предназначенного для решения уравнений гармонического баланса.

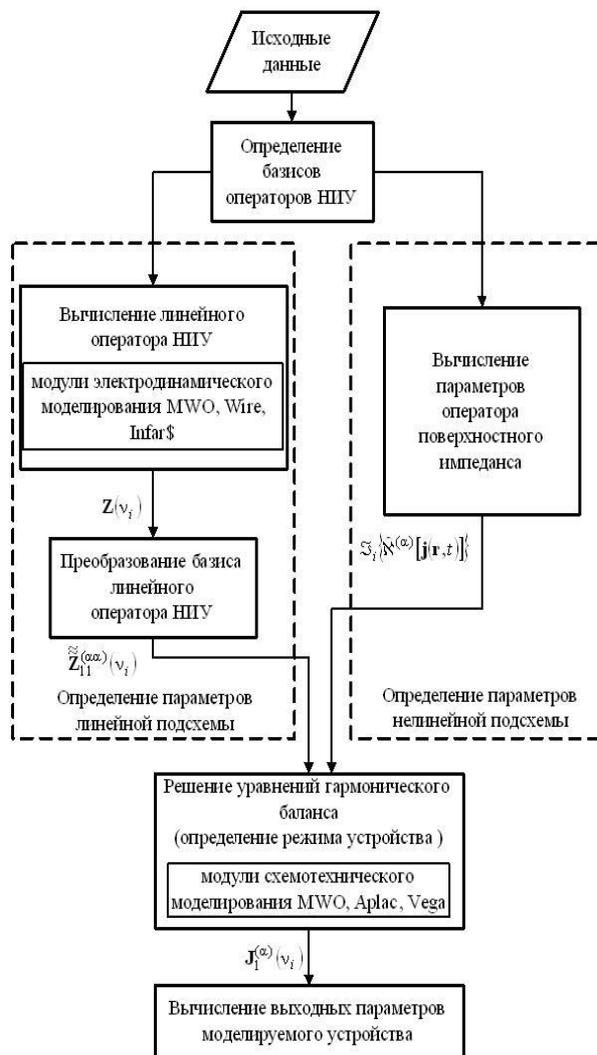


Рис. 1. Блок-схема алгоритма моделирования

Если предположить, что  $\tilde{\mathbf{K}}^{(\omega)}[\mathbf{j}(\mathbf{r},t)]=0$ , то результатом решения уравнений гармонического баланса будет вектор  $\mathbf{J}_1^{(\omega)}(v_i)$ , определяющий распределение по-

верхностной плотности тока для структуры, выполненной из идеальных проводников. По сути, в этом случае решается система линейных интегральных уравнений и с помощью модуля гармонического баланса реализуется операция:

$$\mathbf{J}_1^{(\omega)}(\omega) = \left[ \tilde{Z}_{11}^{(aa)}(\omega) \right]^{-1} \tilde{\mathbf{U}}_1^{(\omega)}(\omega) \quad (1)$$

Проведем исследование условий конвергентности для микрополосковой линии передачи.

Результаты, полученные для микрополосковой линии с нелинейностью индуктивного характера, представлены на рис. 2.

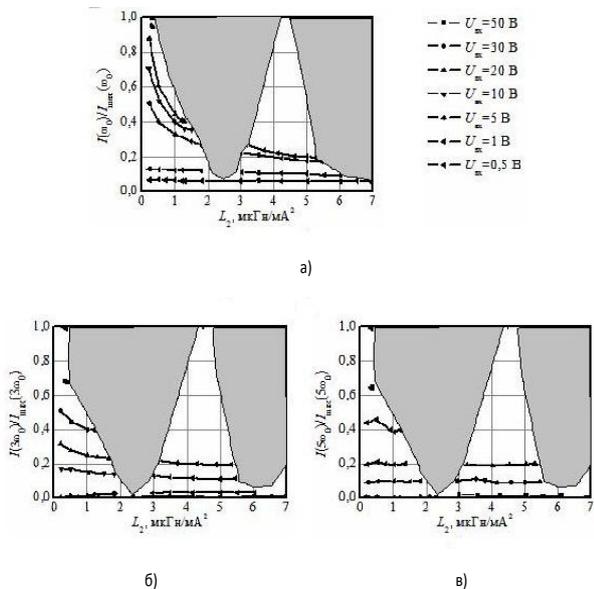


Рис.2. Зависимость амплитуды тока нагрузки МПЛ на 1-й, 3-й и 5-й гармониках от степени индуктивной нелинейности вибратора при различных входных воздействиях ( а) -  $I_{\max}(\omega_0)=200$  мА; б) -  $I_{\max}(3\omega_0)=50,2$  мА; в) -  $I_{\max}(5\omega_0)=21,1$  мА )

Таким образом, для микрополосковой линии при исследовании индуктивного характера нелинейностей обнаружены участки, на которых не было найдено единственное решение. Выявлены участки при определенных значениях нелинейности и величин входного воздействия, при которых в системе устанавливался единственный периодический процесс, то есть на этих участках данное устройство было конвергентным.

Следует отметить, что аналогичное поведение наблюдается и в случае проволочного вибратора [4], а также ленточного вибратора с нелинейными индуктивными характеристиками поверхностного импеданса в свободном пространстве [2].

Рассмотрим более подробно особенности режима неконвергентных устройств.

### 3. Особенности нелинейного режима неконвергентных электродинамических устройств

Исследовался нелинейный режим устройства на примере отрезка несимметричной микрополосковой линии длиной  $l_{sc}=\lambda_l/2$ , расположенный на диэлектрической подложке толщиной  $h=1$  мм (рис. 3,а,г).

Материал подложки был выбран с характеристиками близкими по своим диэлектрическим свойствам к оксиду алюминия.

Относительная диэлектрическая и магнитная проницаемости и удельная проводимость приняты  $\epsilon_r=10$ ,  $\mu_r=1$ ,  $\sigma=0$ . Ширина проводника  $W=0,98$  мм была выбрана из соображений обеспечения характеристического сопротивления линии 50 Ом. Предполагается, что подложка расположена внутри корпуса в виде прямоугольного параллелепипеда, боковые грани которого и нижняя грань идеально проводящие, а верхняя грань открыта. Один вход линии возбуждался источником ЭДС, включенным в щель шириной  $\Delta$  между

проводником линии и проводящей гранью и создающим в щели напряженность электрического поля  $E^{ст}$ , а второй вход нагружен на сопротивление  $Z_H=50$  Ом (рис. 3,б,в).

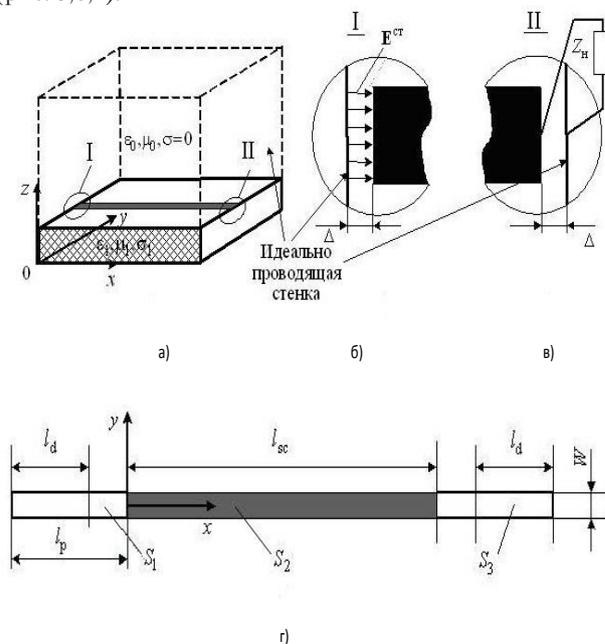


Рис.3. Эскиз моделируемой микрополосковой линии

Для исключения влияния области возбуждения и области нагрузки рассчитывались элементы матрицы рассеяния линии в сечениях плоскостей отсчета фаз  $l_p=l_d \geq \lambda_l/4$ . При расчетах по алгоритму решения НИУ изменялась точность представления элементов матрицы  $\tilde{Z}_{11}^{(\alpha\omega)}(v_1)$ , которая вычислялась с использова

нием модуля EMSight пакета Microwave Office.

Расчеты проведены в предположении, что нелинейность поверхностного импеданса сверхпроводника носит индуктивный характер и описывается зависимостью

$$L(I)=L_0+L_2I^2. \tag{2}$$

Значения коэффициентов варьировались в широких пределах для того, чтобы попытаться выяснить как можно более общие свойства исследуемого устройства. Вначале были рассчитаны зависимости уровня выходной мощности на основной частоте и частотах высших гармоник от входной мощности при двух значениях коэффициента  $L_2$ :  $L_2=10$  мкГн/А<sup>2</sup> и  $L_2=100$  мкГн/А<sup>2</sup>. Они приведены на рис. 4 и рис. 5, соответственно. Данные зависимости показывают, что в обоих случаях наблюдается довольно резкий переход от режима слабой к режиму сильной нелинейности. Это происходит при  $P_{вх}=P_{гр} \approx 15$  дБм для  $L_2=10$  мкГн/А<sup>2</sup> и при  $P_{вх}=P_{гр} \approx 5$  дБм - для  $L_2=100$  мкГн/А<sup>2</sup>. Поведение зависимостей  $P_{вых}(\omega_0)$  от  $P_{вх}$  существенно различно в разных областях. Наиболее значимо то, что при больших  $P_{вх}$  наблюдается резкий рост уровня четных гармоник (второй и четвертой) (см. рис. 4,г,д и рис. 5,г,д), что нельзя объяснить только лишь возрастанием уровня нелинейных искажений за счет роста уровня входного воздействия. Дело в том, что для

конвергентных устройств, нелинейность в которых описывается зависимостью

$$u(t) = L_2 i^2(t) \frac{di(t)}{dt} \quad (3)$$

не должно быть образования четных гармоник в отклике устройства.

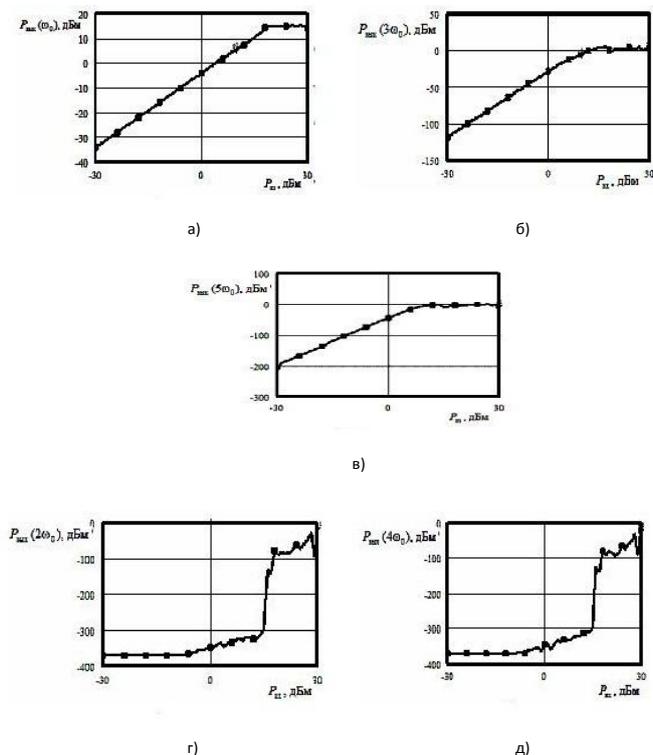


Рис. 4. Зависимость уровня выходной мощности на основной частоте и частотах высших гармоник от входной мощности при  $L_2 = 10 \text{ мкГн}/\text{А}^2$

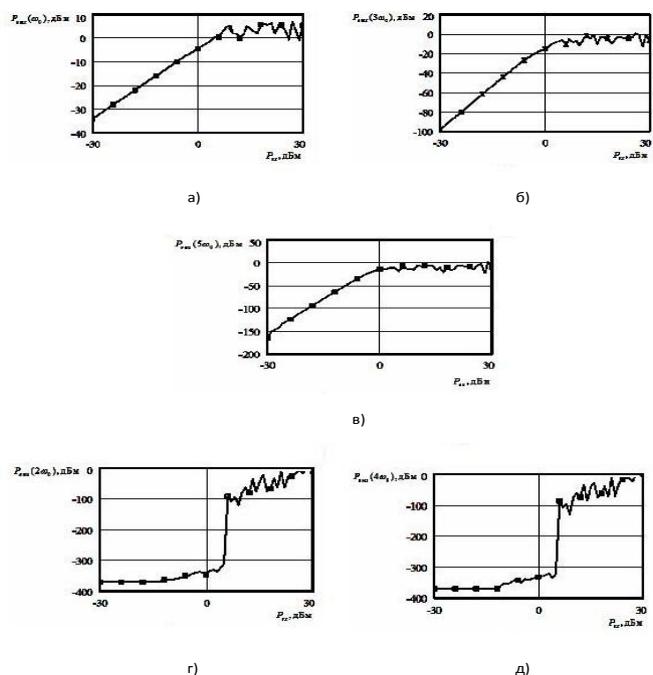


Рис. 5. Зависимость уровня выходной мощности на основной частоте и частотах высших гармоник от входной мощности при  $L_2 = 100 \text{ мкГн}/\text{А}^2$

Генерация четных гармоник может быть объяснена лишь тем, что устройство теряет свойство конвергентности при  $P_{\text{вх}} > P_{\text{гр}}$ . При расчете нелинейного режима в этом случае метод гармонического баланса неприменим, так как он изначально предполагает существование периодического режима с заранее известным периодом основной частоты. Для более детального исследования особенностей этого режима устройства были проведены расчеты временных зависимостей тока в нагрузке МПЛ с использованием метода TLM и индуктивного характера нелинейного поверхностного импеданса. Нелинейные свойства описывались соотношением (3). Длина линии выбрана равной  $l_{\text{sc}} = \lambda_{\text{л}}/2$ . В данном случае была использована эквивалентная схема ячейки, показанная на рис. 6 (на рис. 6 показано соединение двух таких ячеек). В ней отрезок линии передачи представлен LC звеном с дополнительно включенной нелинейной индуктивностью, отражающей свойства поверхностного импеданса проводника. Полуволновой отрезок линии моделировался каскадным соединением 17 таких ячеек.

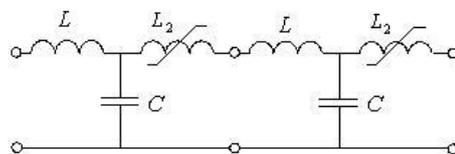


Рис. 6. Соединение двух элементарных TLM-ячеек

Согласно данной схеме модель устройства содержит нелинейные контура, образованные нелинейной индуктивностью  $(L_2 + L)$  и емкостью  $C/2$ , которые могут быть причиной генерации субгармоник с частотой  $\omega_0/n$ , что приводит, как минимум, к удвоению периода колебаний в устройстве. Это один из признаков перехода к режиму динамического хаоса [5]. Были промоделированы два режима МПЛ с  $L_2 = 10 \text{ мкГн}/\text{А}^2$  – режим слабой нелинейности ( $P_{\text{вх}} = (-2, -1, 0) \text{ дБм}$ ) и режим сильной нелинейности ( $P_{\text{вх}} = (28, 29, 30) \text{ дБм}$ ). Результаты моделирования показаны на рис. 7,а,б и рис. 7,в,г, соответственно.

Видно, что в режиме слабой нелинейности форма  $i_{\text{ввых}}(t)$  близка к синусоидальной, а спектр дискретный и содержит только нечетные гармоники. При этом незначительное изменение входной мощности  $P_{\text{вх}} = (-2; -1; 0)$  приводит к изменению только амплитуды тока, не сказываясь на форме  $i_{\text{ввых}}(t)$ .

Совершенно иная ситуация в режиме сильной нелинейности. В этом режиме зависимость  $i_{\text{ввых}}(t)$  является непериодической, её форма значительно отличается от синусоидальной, а спектр – непрерывный с максимальной плотностью вблизи частоты  $\omega_0$ . Более того, как наглядно видно из рис. 8, на котором показаны временные зависимости тока в другом временном интервале, отклик устройства  $i_{\text{ввых}}(t)$  существенно зависит от незначительных изменений  $P_{\text{вх}}$  в режиме сильной нелинейности (рис. 8,б) и практически не зависит

в режиме слабой нелинейности (рис. 8,а). На рис. 8,а кривые 1, 2 и 3 соответствуют уровням мощности -2, -1 и 0 дБм, а на рис. 8,б – уровням 28, 29 и 30 дБм.

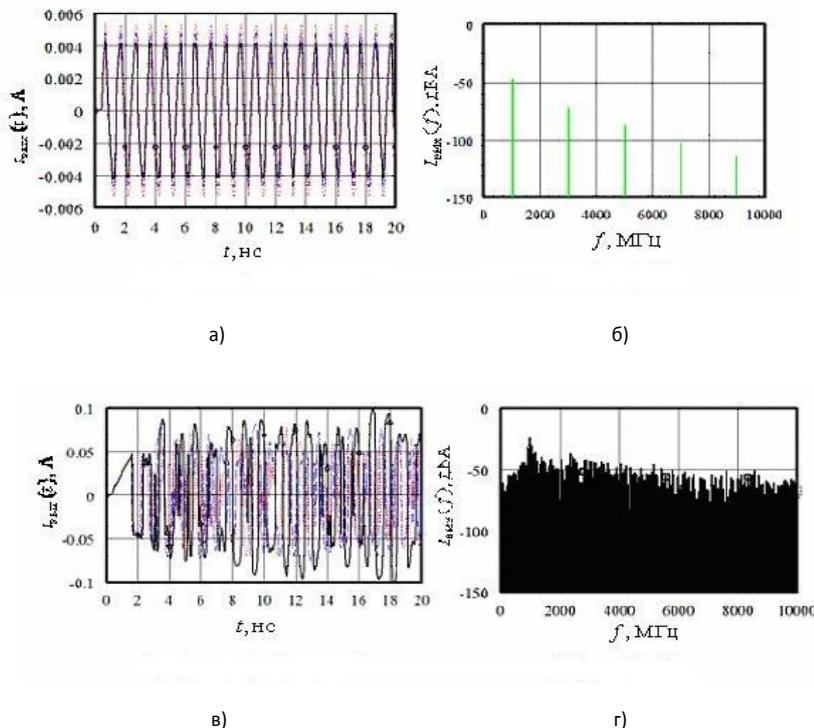


Рис.7. Временные зависимости и спектральная плотность тока в нагрузке МПЛ при различных уровнях входной мощности: а)  $P_{вх}=(-2; -1; 0)$  дБм, б)  $P_{вх}= 0$  дБм, в)  $P_{вх}=(28; 29; 30)$  дБм, г)  $P_{вх}=30$  дБм

Таким образом, результаты проведенных исследований позволяют утверждать, что в устройствах с индуктивным характером поверхностного импеданса режимы слабой и сильной нелинейности имеют существенное различие. При этом в режиме сильной нели-

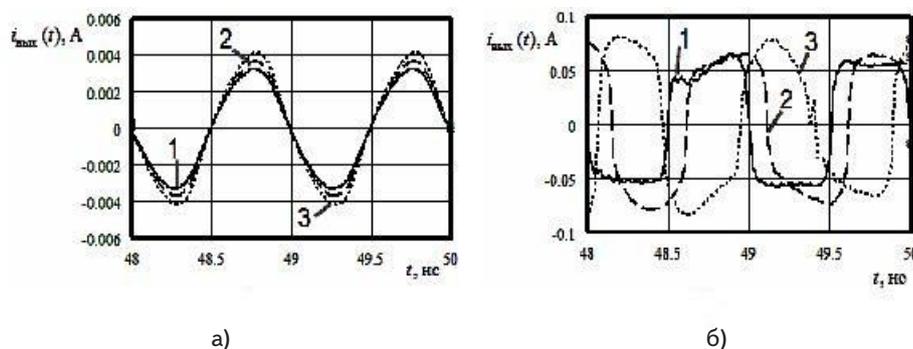


Рис.8. Временные зависимости тока в нагрузке МПЛ при различных уровнях входной мощности

нейности присутствуют явные три признака режима динамического хаоса:

- не соблюдаются условия конвергентности;
- непрерывный спектр колебаний;
- сильная зависимость режима от незначительных изменений начальных условий.

#### 4. Выводы

Для ряда нелинейных неконвергентных устройств с индуктивным характером нелинейности обнаружены области, в которых при определенных значениях нелинейности и величин входного воздействия, в системе устанавливался единственный периодический процесс, то есть на этих участках данное устройство было конвергентным. Наряду с этим обнаружены участки, на которых не было единственного решения.

В устройствах с индуктивным характером поверхностного импеданса режимы слабой и сильной нелинейности имеют существенное различие. При этом в режиме сильной нелинейности присутствуют явные три признака режима динамического хаоса - не соблюдаются условия конвергентности, колебания имеют непрерывный спектр, присутствует сильная зависимость режима от незначительных изменений начальных условий. Однако этот режим требует более подробных исследований.

#### Литература

1. Данилов Л.В. Нелинейные конвергентные электрические цепи [Текст] / Л.В. Данилов // Теоретическая электротехника. – 1970. – Вып. 9. – С. 87–93.
2. Крикун Е.В. Условие конвергентности нелинейных электродинамических устройств [Текст] / Е.В. Крикун, А.И. Лучанинов, Д.С. Гавва // Радиоэлектроника. Известия вузов. – 2011. – Вып. № 2. – С. 54–63.
3. Синицкий Л.А. О периодическом режиме в электрической цепи, содержащей нелинейные сопротивления [Текст] / Л.А. Синицкий // Автоматический контроль и измерительная техника. Киев, АН УССР. – 1960. – Вып. 4. – С. 54–57.
4. Лучанинов А.И. Электродинамические устройства с нелинейными свойствами поверхностного импеданса. Условие конвергентности [Текст] / А.И. Лучанинов, В.В. Журбенко. – Радиотехника. – 2005. – Вып. 140. – С. 19-27. – (Всеукр. межвед. науч. техн. сб.)
5. Лоскутов А.Ю. Введение в синергетику [Текст] / А.Ю. Лоскутов, А.С. Михайлов. – М.: Наука, 1990. – 272 с.