

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

для решения уравнений гармонического баланса, результатом которого является вектор $J_1^{(\omega)}(v_i)$, 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 $\mathfrak{S}_i\{\tilde{\mathfrak{K}}^{(\omega)}[j(r,t)]\}$ 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 $\tilde{\mathfrak{K}}^{(\omega)}[j(r,t)] = 0$, то результатом решения уравнений гармонического баланса будет вектор $J_1^{(\omega)}(v_i)$, 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:

$$J_1^{(\omega)}(\omega) = \left[\tilde{Z}_{11}^{(aa)}(\omega) \right]^{-1} \tilde{U}_1^{(\omega)}(\omega) \quad (1)$$

Проведем исследование условий конвергентности для микрополосковой линии передачи.

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

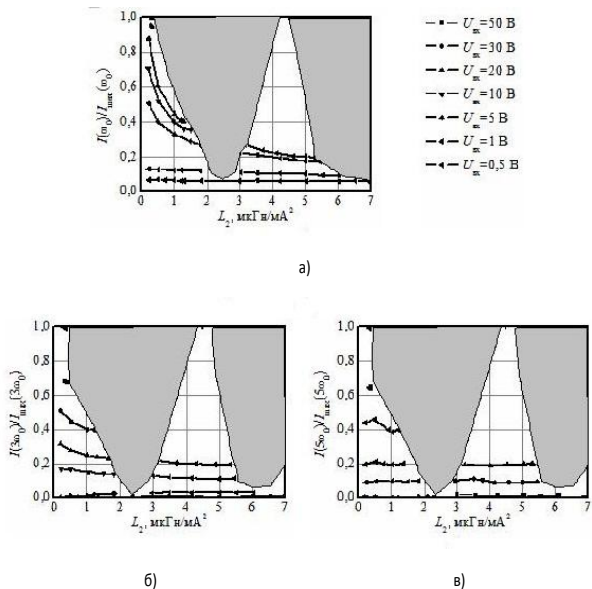


Рис.2. Зависимость амплитуды тока нагрузки МПЛ на 1-й, 3-й и 5-й гармониках от степени индуктивной нелинейности вибратора при различных входных воздействиях (а) - $I_{\max}(\omega_0)=200$ мА; б) - $I_{\max}(3\omega_0)=50,2$ мА; в) - $I_{\max}(5\omega_0)=21,1$ мА)

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 Δ 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).

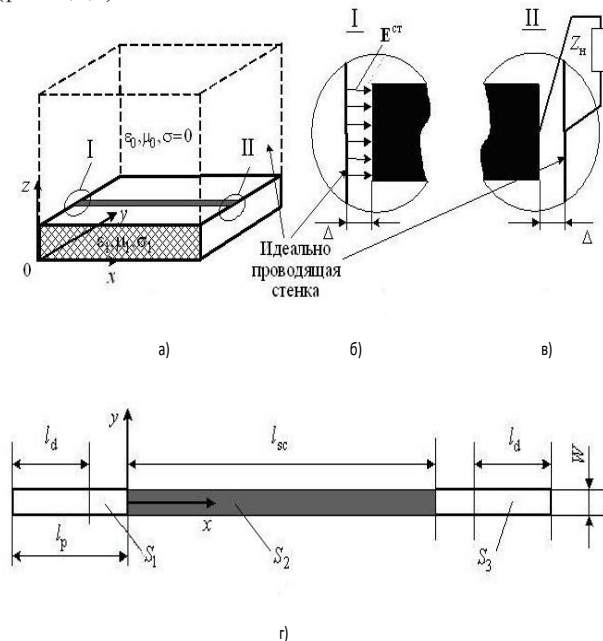


Рис.3. Эскиз моделируемой микрополосковой линии

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/А² и $L_2=100$ мкГн/А². 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/А² и при $P_{вх}=P_{гр} \approx 5$ дБм - для $L_2=100$ мкГн/А². 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.

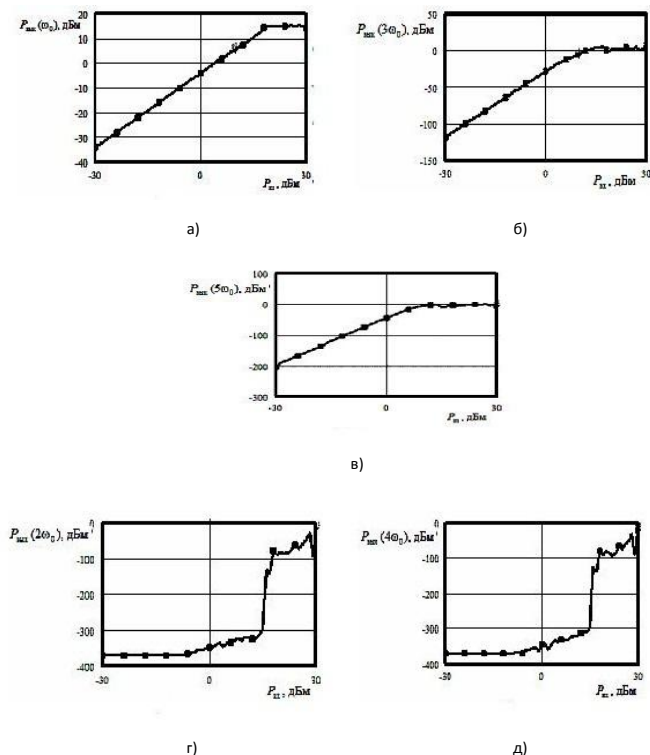


Рис.4. Зависимость уровня выходной мощности на основной частоте и частотах высших гармоник от входной мощности при $L_2 = 10 \text{ мкГн}/\text{А}^2$

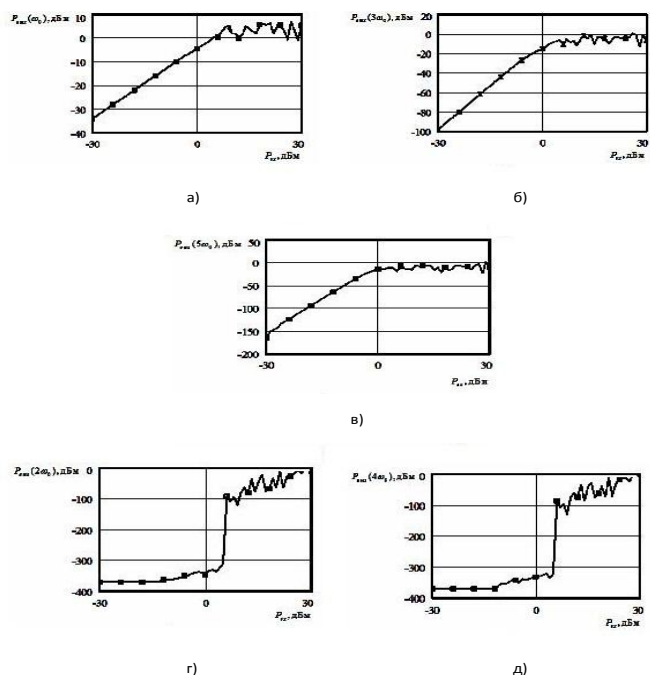


Рис.5. Зависимость уровня выходной мощности на основной частоте и частотах высших гармоник от входной мощности при $L_2 = 100 \text{ мкГн}/\text{А}^2$

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.

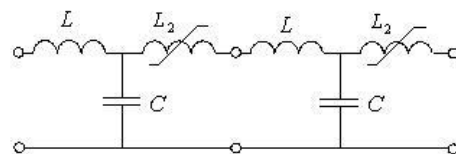


Рис.6. Соединение двух элементарных TLM-ячеек

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 ω_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 ω_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.

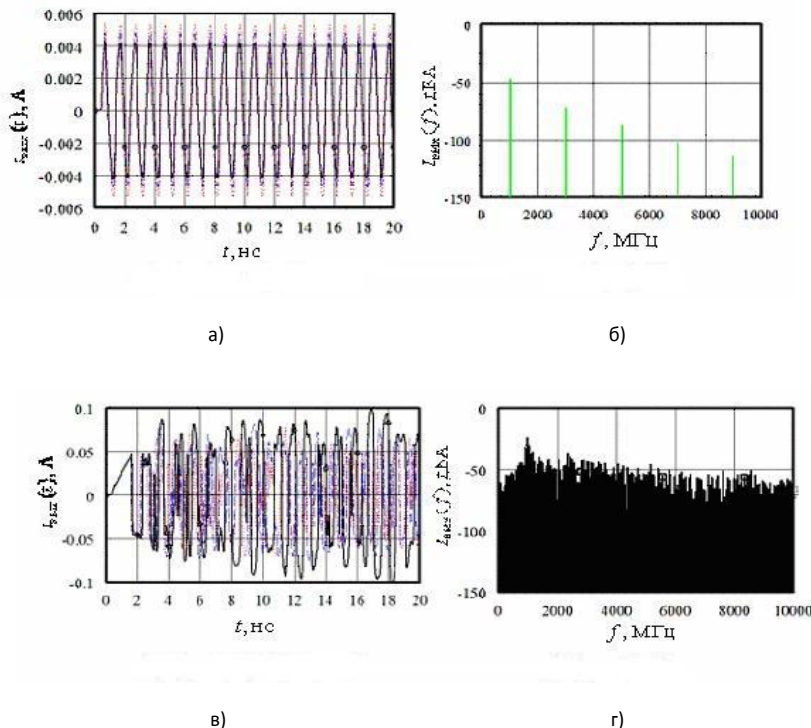


Рис.7. Временные зависимости и спектральная плотность тока в нагрузке МПЛ при различных уровнях входной мощности: а) $P_{вх}=(-2; -1; 0)$ дБм, б) $P_{вх}= 0$ дБм, в) $P_{вх}=(28; 29; 30)$ дБм, г) $P_{вх}=30$ дБм

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-

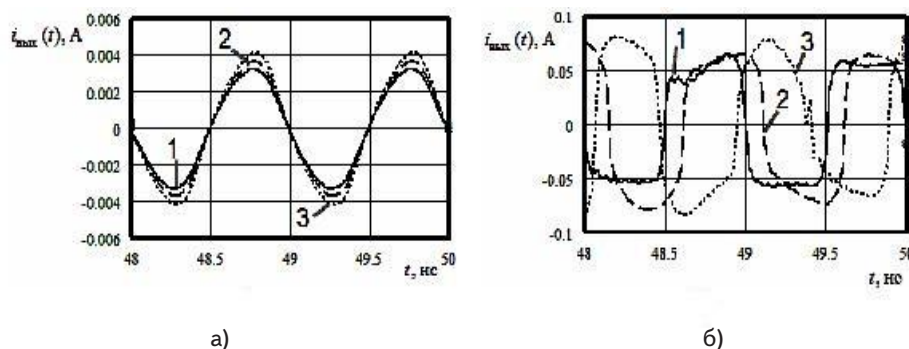


Рис.8. Временные зависимости тока в нагрузке МПЛ при различных уровнях входной мощности

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.