

*Д.В. ГРЕЦКИХ, канд. техн. наук, В.Г. ЛИХОГРАЙ, канд. физ.-мат. наук,
А.А. ЩЕРБИНА, канд. техн. наук, А.В. ГОМОЗОВ, канд. техн. наук*

ВНЕШНИЕ ПАРАМЕТРЫ СИСТЕМ БЕСПРОВОДНОЙ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ

Введение

За последнее время фронт исследований по проблеме БПЭ существенно расширился [1, 2]. Развиваются технологии БПЭ, разрабатываются проекты систем БПЭ различного класса и назначения, проводятся многочисленные теоретические и экспериментальные их исследования [3 – 8]. Видно, что к настоящему времени в этой области сделано немало, а технический уровень разработок отдельных подсистем систем БПЭ достаточно высок для успешного практического их внедрения в ближайшем будущем. Тем не менее, несмотря на значительные достижения в области БПЭ, все еще много вопросов находятся на начальной стадии исследований. В работе [9] для эффективного проектирования систем БПЭ предложено использовать электродинамический подход, в рамках которого вся система БПЭ, включающая передающую подсистему, ректенну и систему рассеивателей, рассматривается как единая многовходовая антенная система с нелинейными характеристиками. Получены уравнения состояния такой системы. Обоснован выбор вектора входных параметров многовходовой системы и предложено структурировать его компоненты таким образом, что одна из групп выходных параметров характеризует процессы передачи электромагнитной энергии и ее преобразование в постоянный ток в самой системе (внутрисистемные процессы), а вторая – процессы электродинамического взаимодействия системы БПЭ с другими электродинамическими системами (внесистемное взаимодействие), что позволяет при моделировании оценить характеристики системы БПЭ в условиях, близких к реальной электромагнитной обстановке.

Обе группы указанных характеристик определяются блоками матрицы рассеяния излучающей структуры системы БПЭ, которые найдены в [10, 11]. Показано, что блоки матрицы рассеяния, описывающие внесистемные взаимодействия, можно получить через блок матрицы рассеяния, описывающей внутрисистемные процессы.

Цель работы – изложение заключительного этапа общей процедуры анализа систем БПЭ, связанного с определением ее параметров, позволяющих описать процессы передачи энергии и ее преобразование в самой системе БПЭ (внутрисистемные процессы [10]), взаимодействие системы БПЭ с другими радиоэлектронными средствами и взаимодействие других радиоэлектронных средств с системой БПЭ (внесистемное взаимодействие [11]).

1. Электродинамический подход к анализу систем БПЭ

Рассмотрим систему БПЭ, в которой передающая и приемная (ректенна) подсистемы имеют произвольные конфигурации (рис. 1) и в составе их антенн и антенных трактов имеются нелинейные элементы (НЭ). В состав систем БПЭ могут входить и другие принципиально необходимые функциональные блоки (например, системы наведения микроволнового луча на апертуру ректенны, каналы связи между передающими позициями в системах БПЭ с многопозиционными системами излучателей [3, 12] и т.д.), помимо приведенных на схеме (рис. 1), и наоборот, некоторые функциональные блоки могут отсутствовать.

Примером могут служить системы БПЭ, преобразующие энергию окружающего электромагнитного поля в постоянный ток, в которых отсутствует передающая подсистема. Эти особенности построения систем БПЭ учитывались в [9] при разработке ее универсальной нелинейной математической модели электродинамического уровня.

На рис. 1 приведены следующие обозначения: Г – генератор, УМ – усилитель мощности, СЦ – согласующая цепь, НЭ – нелинейный элемент, ФВ – фазовращатель, АТ – аттенюатор, Р – рассеиватель, ФНЧ – фильтр нижних частот, ФПТ – фильтр постоянного тока, Н – нагрузка.

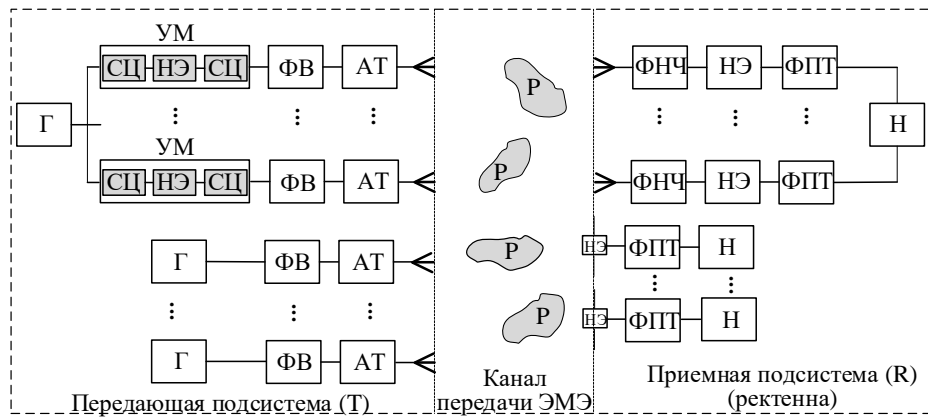


Рис. 1. Структурная схема системы РЭ произвольной конфигурации

Выделим в передающей (Т) и приемной (R) подсистемах системы РЭ (рис. 1) нелинейные подсистемы (НПС), линейные подсистемы (ЛПС), излучающие системы (ИС), генераторы и нагрузки (рис. 2).

В ЛПС входят линии передачи, согласующие цепи, фазовращатели, аттенюаторы и совокупность всех остальных линейных элементов передающего антенно-фидерного тракта и ректенны соответственно. В НПС входят все активные и пассивные НЭ.

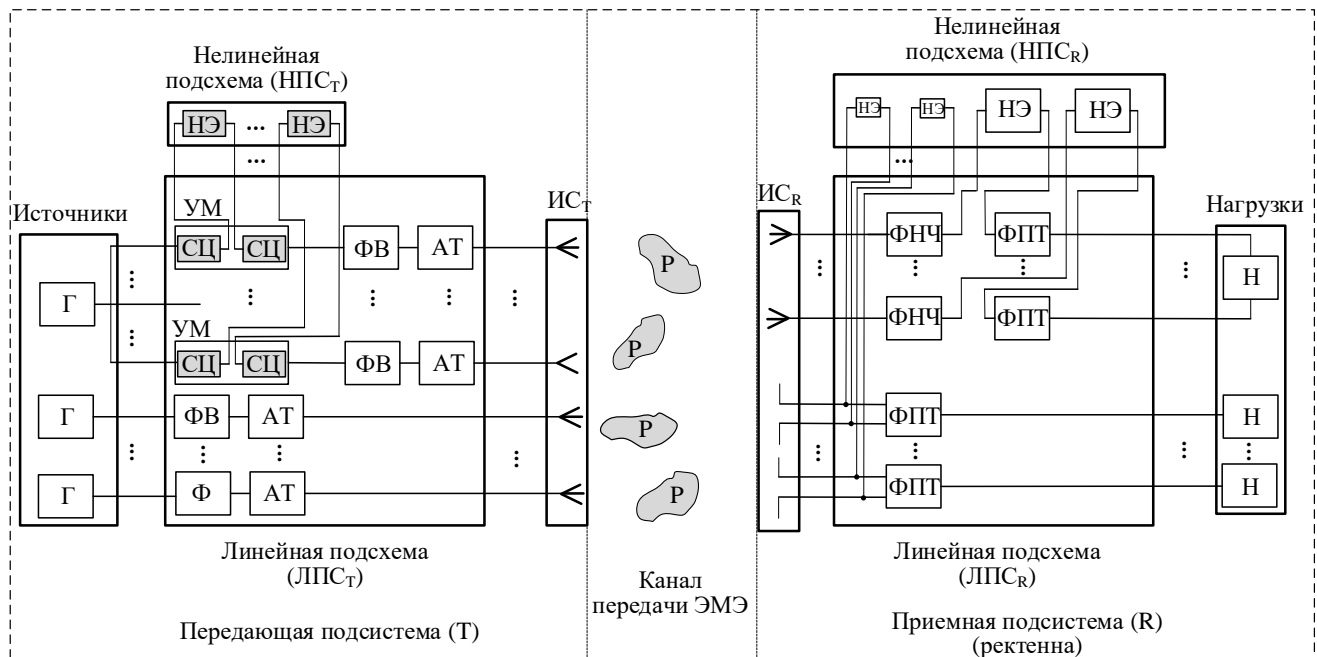


Рис. 2. Представление системы РЭ в виде подсистем

Представим схему на рис. 2 в более компактном виде. Для этого объединим НПС_Т передающей подсистемы и НПС_Р приемной подсистемы в нелинейную подсистему НПС_{ТР}, которую назовем «нелинейная подсистема системы РЭ» (рис. 3). Объединим линейные подсистемы передающей подсистемы ЛПС_Т и приемной подсистемы ЛПС_Р в линейную подсистему ЛПС_{ТР} системы РЭ, излучающую структуру ИС_Т передающей подсистемы, систему рассеивателей (P) (которые учитывают влияние подстилающей поверхности и иных материальных тел, расположенных вблизи передающей антенны и ректенны, например, затеняющих металлоконструкций, импедансных структур и т.п.) и ИС_Р ректенны в подсистему ИС_{ТР} излучающей структуры системы РЭ, а источники и нагрузки в подсистему, которую назовем «внешние устройства (ВУ_{ТР}) системы РЭ».

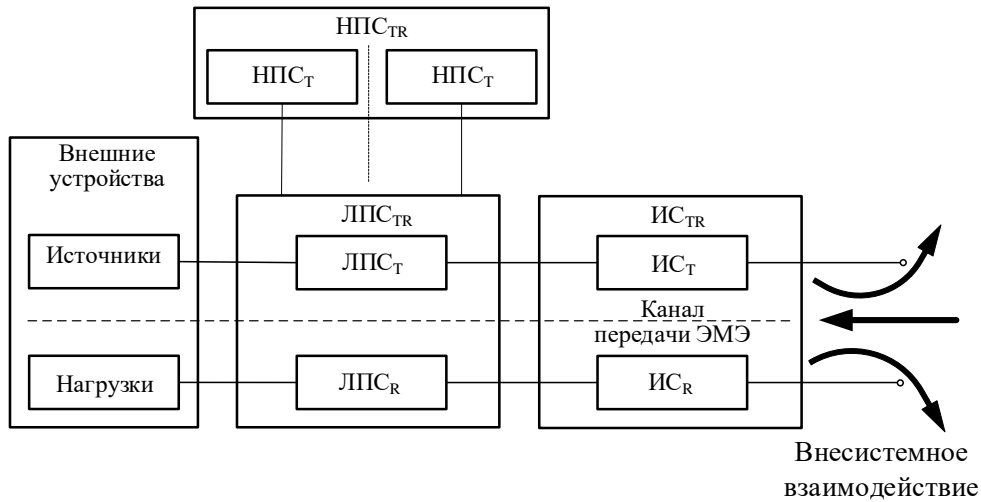


Рис. 3. Структурная схема системы БПЭ

Поставим в соответствие каждой подсхеме системы БПЭ (нелинейной НПС_{TR}, линейной ЛПС_{TR}, излучающей структуре ИС_{TR}, внешним устройствам ВУ_{TR}) соответствующие многополюсники (рис. 4).

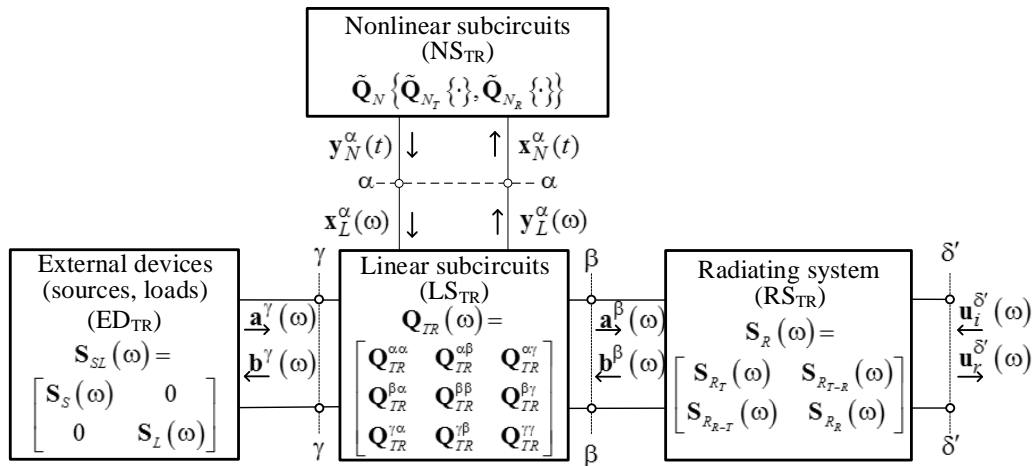


Рис. 4. Представление системы БПЭ в виде многовходовой антенной системы

Выбор моделей НПС_{TR}, ЛПС_{TR}, ИС_{TR}, ВУ_{TR}, выбор вектора переменных состояния системы БПЭ и формирование уравнений состояния детально описано в [9].

Следует отметить, что полученная в [9] система уравнений состояния пригодна для анализа широкого класса систем БПЭ [1 – 3, 12], так как при ее выводе на вид матриц, описывающих линейный многополюсник системы БПЭ (ЛПС_{TR}), многополюсники ее излучающей структуры (ИС_{TR}) и внешних устройств (ВУ_{TR}), никаких ограничений не налагалось.

Таким образом, в [9] предлагается рассматривать систему БПЭ, включающую в свой состав ВУ_{TR}, ЛПС_{TR}, НПС_{TR}, ИС_{TR} (рис. 4), как единую многовходовую антенную систему с нелинейными характеристиками. Компоненты вектора выходных параметров группируются таким образом, что одна из групп выходных параметров характеризует процессы передачи электромагнитной энергии и ее преобразование в постоянный ток ректенной в самой системе БПЭ (внутрисистемные процессы [11]), а вторая – процессы электродинамического взаимодействия системы БПЭ с другими электродинамическими системами (внесистемное взаимодействие, для учета которого на рис.4 выделена дополнительная группа входов – сечение δ' – δ' [10]).

Такое представление имеет только одно ограничение – взаимодействующие системы (система БПЭ и другие радиоэлектронные системы) должны находиться в дальней зоне друг от друга. Что же касается передающей антенны и ректенны одной системы, то они могут

находиться на любом расстоянии, если например, элементы матрицы $\mathbf{S}_R(\omega)$ (рис. 4) определяются из решения краевых задач электродинамики, что было сделано в [11].

Достоверность применяемого подхода для построения нелинейной математической модели электродинамического уровня системы БПЭ [9 – 11] подтверждена на частном примере, путем сравнения результатов моделирования крупноапертурной ректенны с известными экспериментальными данными [13].

2. Определение вектора выходных параметров системы БПЭ

Параметры системы БПЭ можно определить, вычислив вектор выходных параметров $(\mathbf{b}^\gamma \ \mathbf{u}_r^{\delta'})^T$, который объединяет в себе два вектора: вектор \mathbf{b}^γ , характеризующий связь системы БПЭ с внешними устройствами (генератором и нагрузкой), и вектор $\mathbf{u}_r^{\delta'}$, описывающий связь системы БПЭ с другими радиоэлектронными устройствами, не входящими в ее состав (внесистемное взаимодействие [10]) при заданных входных воздействиях \mathbf{a}^γ , $\mathbf{u}_i^{\delta'}$ и найденном из решения системы уравнений состояния векторе $\mathbf{x}_L^\alpha(\omega)$ (сечение $\alpha - \alpha$ на рис. 4). Формирование компонентов вектора $\mathbf{x}_L^\alpha(\omega)$ и процедура определения изложена в [9].

Рассмотрим воздействие на систему БПЭ нескольких электромагнитных излучений с различными частотами ω_k со стороны внешнего пространства $\mathbf{u}_i^{\delta'}(\omega_k)$ и от внутренних генераторов $\mathbf{a}^\gamma(\omega_k)$ ($k = \overline{0, q}$ – число различных частот входных воздействий), т.е. рассмотрим периодический или почти периодический (при некратных ω_k) режим работы системы БПЭ.

Из-за наличия в составе систем БПЭ антенн и антенных трактов с нелинейными элементами ее отклик необходимо определять по всем возможным комбинациям частотных входных воздействий [14]

$$\mathbf{v}_n = m_0\omega_0 + m_1\omega_1 + \dots + m_q\omega_q, \quad m_k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (1)$$

Используя компонентные уравнения для многополюсников ЛПС_{TR} и ИС_{TR}, приведенных в [9], можно получить соотношения, связывающие векторы $[\mathbf{b}^\gamma(\mathbf{v}_n) \ \mathbf{u}_r^{\delta'}(\mathbf{v}_n)]^T$ и $[\mathbf{x}_L^\alpha(\mathbf{v}_n) \ \mathbf{a}^\gamma(\omega_k) \ \mathbf{u}_i^{\delta'}(\omega_k)]^T$:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{b}^\gamma(\mathbf{v}_n) \\ \mathbf{u}_r^{\delta'}(\mathbf{v}_n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{Q}}_{TR}^{\gamma\alpha}(\mathbf{v}_n) & \tilde{\mathbf{Q}}_{TR}^{\gamma\gamma}(\mathbf{v}_n) & \tilde{\mathbf{Q}}_{TR}^{\gamma\delta'}(\mathbf{v}_n) \\ \tilde{\mathbf{Q}}_{TR}^{\delta'\alpha}(\mathbf{v}_n) & \tilde{\mathbf{Q}}_{TR}^{\delta'\gamma}(\mathbf{v}_n) & \tilde{\mathbf{Q}}_{TR}^{\delta'\delta'}(\mathbf{v}_n) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_L^\alpha(\mathbf{v}_n) \\ \mathbf{a}^\gamma(\omega_k) \\ \mathbf{u}_i^{\delta'}(\omega_k) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где

$$\tilde{\mathbf{Q}}_{TR}^{\gamma\alpha}(\mathbf{v}_n) = \mathbf{Q}_{TR}^{\gamma\alpha}(\mathbf{v}_n) + \mathbf{Q}_{TR}^{\gamma\beta}(\mathbf{v}_n) [\mathbf{S}_{R_T}^{-1}(\mathbf{v}_n) - \mathbf{Q}_{TR}^{\beta\beta}(\mathbf{v}_n)]^{-1} \mathbf{Q}_{TR}^{\beta\alpha}(\mathbf{v}_n),$$

$$\tilde{\mathbf{Q}}_{TR}^{\gamma\gamma}(\mathbf{v}_n) = \mathbf{Q}_{TR}^{\gamma\beta}(\mathbf{v}_n) [\mathbf{S}_{R_T}^{-1}(\mathbf{v}_n) - \mathbf{Q}_{TR}^{\beta\beta}(\mathbf{v}_n)]^{-1} \mathbf{Q}_{TR}^{\beta\gamma}(\mathbf{v}_n) + \mathbf{Q}_{TR}^{\gamma\gamma}(\mathbf{v}_n),$$

$$\tilde{\mathbf{Q}}_{TR}^{\gamma\delta'}(\mathbf{v}_n) = \mathbf{Q}_{TR}^{\gamma\beta}(\mathbf{v}_n) [\mathbf{S}_{R_T}^{-1}(\mathbf{v}_n) - \mathbf{Q}_{TR}^{\beta\beta}(\mathbf{v}_n)]^{-1} \mathbf{Q}_{TR}^{\beta\alpha}(\mathbf{v}_n) \mathbf{S}_{R_T}^{-1}(\mathbf{v}_n) \mathbf{S}_{R_T-R}(\mathbf{v}_n),$$

$$\tilde{\mathbf{Q}}_{TR}^{\delta'\alpha}(\mathbf{v}_n) = \mathbf{S}_{R_R-T}(\mathbf{v}_n) \mathbf{Q}_{TR}^{\beta\alpha}(\mathbf{v}_n) + \mathbf{S}_{R_R-T}(\mathbf{v}_n) \mathbf{Q}_{TR}^{\beta\beta}(\mathbf{v}_n) [\mathbf{S}_{R_T}^{-1}(\mathbf{v}_n) - \mathbf{Q}_{TR}^{\beta\beta}(\mathbf{v}_n)]^{-1} \mathbf{Q}_{TR}^{\beta\alpha}(\mathbf{v}_n),$$

$$\tilde{\mathbf{Q}}_{TR}^{\delta'\gamma}(\mathbf{v}_n) = \mathbf{S}_{R_R-T}(\mathbf{v}_n) \mathbf{Q}_{TR}^{\beta\beta}(\mathbf{v}_n) [\mathbf{S}_{R_T}^{-1}(\mathbf{v}_n) - \mathbf{Q}_{TR}^{\beta\beta}(\mathbf{v}_n)]^{-1} \mathbf{Q}_{TR}^{\beta\gamma}(\mathbf{v}_n) + \mathbf{S}_{R_R-T}(\mathbf{v}_n) \mathbf{Q}_{TR}^{\beta\gamma}(\mathbf{v}_n),$$

$$\tilde{\mathbf{Q}}_{TR}^{\delta'\delta'}(\mathbf{v}_n) = \mathbf{S}_{R_R-T}(\mathbf{v}_n) \mathbf{Q}_{TR}^{\beta\beta}(\mathbf{v}_n) [\mathbf{S}_{R_T}^{-1}(\mathbf{v}_n) - \mathbf{Q}_{TR}^{\beta\beta}(\mathbf{v}_n)]^{-1} \mathbf{S}_{R_T}^{-1}(\mathbf{v}_n) \mathbf{S}_{R_T-R}(\mathbf{v}_n) + \mathbf{S}_{R_R}(\mathbf{v}_n).$$

Уравнение (2) является матричной записью системы выходных уравнений для системы БПЭ, описываемой схемой на рис. 4. Здесь и далее под ν_n понимается набор частот, для которых необходимо определить вектор выходных параметров системы БПЭ и, следовательно, ее внешние параметры, а под ω_k – частоты входных воздействий.

Зная вектор входных параметров системы БПЭ, можно определить все ее внешние параметры. При этом необходимо сделать следующие важные замечания.

Во-первых, соотношение (2) является линейным, связывающим вектор выходных параметров и векторы $\mathbf{x}_L^\alpha(\nu_n)$, $\mathbf{a}^\gamma(\omega_k)$, $\mathbf{u}_i^{\delta'}(\omega_k)$. В действительности нелинейная зависимость $\mathbf{x}_L^\alpha(\nu_n)$ от $\mathbf{a}^\gamma(\omega_k)$ и $\mathbf{u}_i^{\delta'}(\omega_k)$, описываемая уравнениями состояния [9], приводит к нелинейной зависимости всех внешних параметров системы БПЭ от величины входных воздействий. Поэтому, строго говоря, характеризуя систему БПЭ значением того или иного внешнего параметра, необходимо указать, при каких уровнях внешних воздействий получено данное значение.

Во-вторых, наличие НЭ приводит к появлению в спектре $\mathbf{x}_L^\alpha(\nu_n)$ на входах линейной подсхемы (рис. 4 сечение $\alpha - \alpha$) новых спектральных составляющих с частотами ν_n , не совпадающих с частотами входных воздействий, т.е. $\nu_n \neq \omega_k$. На этих частотах $\mathbf{a}^\gamma(\nu_n \neq \omega_k) = 0$, $\mathbf{u}_i^{\delta'}(\nu_n \neq \omega_k) = 0$ и (2) примет вид

$$\begin{bmatrix} \mathbf{y}_L^\alpha(\nu_n) \\ \mathbf{b}^\gamma(\nu_n) \\ \mathbf{u}_r^{\delta'}(\nu_n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{Q}}_{TR}^{\alpha\alpha}(\nu_n) \\ \tilde{\mathbf{Q}}_{TR}^{\gamma\alpha}(\nu_n) \\ \tilde{\mathbf{Q}}_{TR}^{\delta'\alpha}(\nu_n) \end{bmatrix} \mathbf{x}_L^\alpha(\nu_n). \quad (3)$$

Так как соотношения (2) и (3) получены для обобщенной схемы системы БПЭ (рис. 4), то видно, что любая система БПЭ, в состав которой входят антенны с НЭ, является источником колебаний с частотами $\nu_n \neq \omega_k$. Эти колебания обнаруживаются на входах многополюсника внешних устройств (вектор $\mathbf{b}^\gamma(\nu_n \neq \omega_k)$) и в свободном пространстве в виде побочных излучений системы (вектор $\mathbf{u}_r^{\delta'}(\nu_n \neq \omega_k)$).

Поэтому определять внешние параметры системы БПЭ требуется не только на частотах входных воздействий, но и на частотах $\nu_n \neq \omega_k$, что приводит к необходимости характеризовать системы БПЭ большим числом внешних параметров.

3. Внешние параметры системы БПЭ, описывающие внесистемное взаимодействие

Внешние параметры системы БПЭ, характеризующие ее связь с другими радиоэлектронными средствами (внесистемное взаимодействие), получим, используя результаты работы [10] и соотношение (2).

Напряженность электрического поля в дальней зоне

$$\vec{\mathbf{E}}(\nu_n, r, \theta, \varphi) = \sqrt{2W_0} \mathbf{e}^T(\nu_n, \theta, \varphi) \mathbf{u}_r^{\delta'}(\nu_n) \frac{e^{-jkr}}{r}, \quad (4)$$

где W_0 – волновое сопротивление свободного пространства; $\mathbf{e}(\nu_n, \theta, \varphi)$ – ортонормированные функции направленности излучающей структуры системы БПЭ, которые можно найти путем ортогонализации ее парциальных функций направленности $\vec{\mathbf{g}}(\nu_n, \theta, \varphi)$ [15], применив к ним матричное преобразование

$$\vec{\mathbf{e}}(\nu_n, \theta, \varphi) = \mathbf{A}^T \vec{\mathbf{g}}(\nu_n, \theta, \varphi), \quad (5)$$

где верхний индекс T обозначает операцию транспонирования; \mathbf{A} – квадратная ортогонализирующая матрица падающих волн найденная в [10].

С учетом соотношений (4) и (5) и соотношения (2) напряженность электрического поля системы в дальней зоне запишется в виде

$$\begin{aligned} \vec{\mathbf{E}}(v_n, r, \theta, \varphi) = \sqrt{2W_0} \left[\vec{\mathbf{g}}^T(v_n, \theta, \varphi) \mathbf{A} \tilde{\mathbf{Q}}_{TR}^{\delta'\alpha}(v_n) \mathbf{x}_L^\alpha(v_n) + \vec{\mathbf{g}}^T(v_n, \theta, \varphi) \mathbf{A} \tilde{\mathbf{Q}}_{TR}^{\delta'\gamma}(v_n) \mathbf{a}^\gamma(\omega_k) + \right. \\ \left. + \vec{\mathbf{g}}^T(v_n, \theta, \varphi) \mathbf{A} \tilde{\mathbf{Q}}_{TR}^{\delta'\delta'}(v_n) \mathbf{u}_i^{\delta'}(\omega_k) \right] \frac{e^{-jkr}}{r}. \end{aligned}$$

а ее диаграмма направленности определяется выражением

$$\begin{aligned} \vec{\mathbf{f}}(v_n, \theta, \varphi) = \vec{\mathbf{g}}^T(v_n, \theta, \varphi) \mathbf{A} \tilde{\mathbf{Q}}_{TR}^{\delta'\alpha}(v_n) \mathbf{x}_L^\alpha(v_n) + \vec{\mathbf{g}}^T(v_n, \theta, \varphi) \mathbf{A} \tilde{\mathbf{Q}}_{TR}^{\delta'\gamma}(v_n) \mathbf{a}^\gamma(\omega_k) + \\ + \vec{\mathbf{g}}^T(v_n, \theta, \varphi) \mathbf{A} \tilde{\mathbf{Q}}_{TR}^{\delta'\delta'}(v_n) \mathbf{u}_i^{\delta'}(\omega_k). \end{aligned}$$

Мощность излучения системы:

$$\begin{aligned} P_\Sigma(v_n) = \mathbf{u}_r^{\delta'^*T}(\omega_k) \mathbf{u}_r^{\delta'}(\omega_k) = \mathbf{x}_L^{\alpha*T}(v_n) \tilde{\mathbf{Q}}_{TR}^{\delta'\alpha*}(v_n) \tilde{\mathbf{Q}}_{TR}^{\delta'\alpha}(v_n) \mathbf{x}_L^\alpha(v_n) + \\ + \mathbf{a}^{\gamma*T}(\omega_k) \tilde{\mathbf{Q}}_{TR}^{\delta'\gamma*}(v_n) \tilde{\mathbf{Q}}_{TR}^{\delta'\gamma}(v_n) \mathbf{a}^\gamma(\omega_k) + \mathbf{u}_i^{\delta'^*T}(\omega_k) \tilde{\mathbf{Q}}_{TR}^{\delta'\delta'^*}(v_n) \tilde{\mathbf{Q}}_{TR}^{\delta'\delta'}(v_n) \mathbf{u}_i^{\delta'}(\omega_k) + \\ + \mathbf{x}_L^{\alpha*T}(v_n) \tilde{\mathbf{Q}}_{TR}^{\delta'\alpha*}(v_n) \tilde{\mathbf{Q}}_{TR}^{\delta'\gamma}(v_n) \mathbf{a}^\gamma(\omega_k) + \mathbf{x}_L^{\alpha*T}(v_n) \tilde{\mathbf{Q}}_{TR}^{\delta'\alpha*}(v_n) \tilde{\mathbf{Q}}_{TR}^{\delta'\delta'}(v_n) \mathbf{u}_i^{\delta'}(\omega_k) + \\ + \mathbf{a}^{\gamma*T}(\omega_k) \tilde{\mathbf{Q}}_{TR}^{\delta'\gamma*}(v_n) \tilde{\mathbf{Q}}_{TR}^{\delta'\alpha}(v_n) \mathbf{x}_L^\alpha(v_n) + \mathbf{a}^{\gamma*T}(\omega_k) \tilde{\mathbf{Q}}_{TR}^{\delta'\gamma*}(v_n) \tilde{\mathbf{Q}}_{TR}^{\delta'\delta'}(v_n) \mathbf{u}_i^{\delta'}(\omega_k) + \\ + \mathbf{u}_i^{\delta'^*T}(\omega_k) \tilde{\mathbf{Q}}_{TR}^{\delta'\delta'^*}(v_n) \tilde{\mathbf{Q}}_{TR}^{\delta'\alpha}(v_n) \mathbf{x}_L^\alpha(v_n) + \mathbf{u}_i^{\delta'^*T}(\omega_k) \tilde{\mathbf{Q}}_{TR}^{\delta'\delta'^*}(v_n) \tilde{\mathbf{Q}}_{TR}^{\delta'\gamma}(v_n) \mathbf{a}^\gamma(\omega_k). \end{aligned}$$

Здесь и в дальнейших выражениях верхний индекс * означает операцию сопряжения по Эрмиту.

4. Внешние параметры системы БПЭ, описывающие внутрисистемные процессы

При определении параметров, описывающих внутрисистемные процессы в системе БПЭ в сечениях $\gamma - \gamma$, $\alpha - \alpha$ и $\beta - \beta$, необходимо выделять у многополюсников соответствующих ВУ_{TR}, ЛПС_{TR}, НПС_{TR} и ИС_{TR} по две группы входов. Одна группа входов (с индексом Т) соответствует передающей подсистеме, а вторая (с индексом R) – приемной (ректенне). Тогда векторы падающих и отраженных волн в сечении $\gamma - \gamma$ многополюсника ВУ_{TR} имеют следующую структуру [9]:

$$\mathbf{b}^\gamma(v_n) = \begin{bmatrix} \mathbf{b}_S^\gamma(v_n) \\ \mathbf{b}_L^\gamma(v_n) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{a}^\gamma(\omega_k) = \begin{bmatrix} \mathbf{a}_S^\gamma(\omega_k) \\ \mathbf{a}_L^\gamma(\omega_k) \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Таким образом, считая известными входные воздействия $\mathbf{a}_S^\gamma(\omega_k)$ и $\mathbf{a}_L^\gamma(\omega_k)$ с помощью системы уравнений (2) можно получить следующие функциональные зависимости

$$\begin{aligned} \mathbf{b}_S^\gamma(v_n) = f(\mathbf{a}_S^\gamma(\omega_k)), \quad \mathbf{b}_S^\gamma(v_n) = f(\mathbf{a}_L^\gamma(\omega_k)), \\ \mathbf{b}_L^\gamma(v_n) = f(\mathbf{a}_S^\gamma(\omega_k)), \quad \mathbf{b}_L^\gamma(v_n) = f(\mathbf{a}_L^\gamma(\omega_k)), \end{aligned}$$

которые полностью описывают процессы внутри системы и позволяют определить ее параметры.

Полную излучаемую мощность $P_{in}(\omega_k)$ определим суммированием активных мощностей, поступающих на вход каждого элемента передающей антенной системы:

$$\begin{aligned}
P_{in}(\omega_k) = & \mathbf{a}_S^{\gamma *T}(\omega_k) \mathbf{a}_S^\gamma(\omega_k) - \mathbf{b}_S^{\gamma *T}(\omega_k) \mathbf{b}_S^\gamma(\omega_k) = \mathbf{a}_S^{\gamma *T}(\omega_k) [\mathbf{E} - \tilde{\mathbf{Q}}_{TR}^{\gamma\gamma *T}(\mathbf{v}_n) \tilde{\mathbf{Q}}_{TR}^{\gamma\gamma}(\mathbf{v}_n)] \mathbf{a}_S^\gamma(\omega_k) - \\
& - \mathbf{x}_{LT}^{\alpha *T}(\mathbf{v}_n) \tilde{\mathbf{Q}}_{TR}^{\gamma\alpha *T}(\mathbf{v}_n) \tilde{\mathbf{Q}}_{TR}^{\gamma\alpha}(\mathbf{v}_n) \mathbf{x}_{LT}^\alpha(\mathbf{v}_n) - \mathbf{u}_i^{\delta' *T}(\omega_k) \tilde{\mathbf{Q}}_{TR}^{\gamma\delta' *T}(\mathbf{v}_n) \tilde{\mathbf{Q}}_{TR}^{\gamma\delta'}(\mathbf{v}_n) \mathbf{u}_i^{\delta'}(\omega_k) - \\
& - \mathbf{x}_{LT}^{\alpha *T}(\mathbf{v}_n) \tilde{\mathbf{Q}}_{TR}^{\gamma\alpha *T}(\mathbf{v}_n) \tilde{\mathbf{Q}}_{TR}^{\gamma\gamma}(\mathbf{v}_n) \mathbf{a}_S^\gamma(\omega_k) - \mathbf{x}_{LT}^{\alpha *T}(\mathbf{v}_n) \tilde{\mathbf{Q}}_{TR}^{\gamma\alpha *T}(\mathbf{v}_n) \tilde{\mathbf{Q}}_{TR}^{\gamma\delta'}(\mathbf{v}_n) \mathbf{u}_i^{\delta'}(\omega_k) - \\
& - \mathbf{a}_S^{\gamma *T}(\omega_k) \tilde{\mathbf{Q}}_{TR}^{\gamma\gamma *T}(\mathbf{v}_n) \tilde{\mathbf{Q}}_{TR}^{\gamma\alpha}(\mathbf{v}_n) \mathbf{x}_{LT}^\alpha(\mathbf{v}_n) - \mathbf{a}_S^{\gamma *T}(\omega_k) \tilde{\mathbf{Q}}_{TR}^{\gamma\gamma *T}(\mathbf{v}_n) \tilde{\mathbf{Q}}_{TR}^{\gamma\delta'}(\mathbf{v}_n) \mathbf{u}_i^{\delta'}(\omega_k) - \\
& - \mathbf{u}_i^{\delta' *T}(\omega_k) \tilde{\mathbf{Q}}_{TR}^{\gamma\delta' *T}(\mathbf{v}_n) \tilde{\mathbf{Q}}_{TR}^{\gamma\alpha}(\mathbf{v}_n) \mathbf{x}_{LT}^\alpha(\mathbf{v}_n) - \mathbf{u}_i^{\delta' *T}(\omega_k) \tilde{\mathbf{Q}}_{TR}^{\gamma\delta' *T}(\mathbf{v}_n) \tilde{\mathbf{Q}}_{TR}^{\gamma\gamma}(\mathbf{v}_n) \mathbf{a}_S^\gamma(\omega_k).
\end{aligned}$$

Полученное соотношение наглядно показывает, что при проектировании систем БПЭ необходимо учитывать, что в излучаемую мощность вносят вклад не только источники $\mathbf{a}_S^\gamma(\omega_k)$, входящие в систему БПЭ, но и источники от внешних радиоэлектронных средств $\mathbf{u}_i^{\delta'}(\omega_k)$, а также поля, возникающие при нелинейных преобразованиях, которые определяются вектором переменных состояния $\mathbf{x}_{LT}^\alpha(\mathbf{v}_n)$.

Мощность в нагрузке ректенны $P_l(\omega_k)$

$$P_l(\omega_k) = \mathbf{b}_L^{\gamma *T}(\mathbf{v}_n) \mathbf{b}_L^\gamma(\mathbf{v}_n) - \mathbf{a}_L^{\gamma *T}(\omega_k) \mathbf{a}_L^\gamma(\omega_k).$$

Учитывая, что $\mathbf{a}_L^\gamma(\omega_k) = \mathbf{S}_L(\mathbf{v}_n) \mathbf{b}_L^\gamma(\mathbf{v}_n)$ [9] получим

$$P_l(\omega_k) = \mathbf{b}_L^{\gamma *T}(\mathbf{v}_n) [\mathbf{E} - \mathbf{S}_L^*(\mathbf{v}_n) \mathbf{S}_L(\mathbf{v}_n)] \mathbf{b}_L^\gamma(\mathbf{v}_n).$$

Коэффициент полезного действия системы БПЭ

$$\eta = \frac{P_l(\omega = 0)}{P_{in}(\omega_k)}.$$

Выводы

В работе показан заключительный этап построения нелинейной математической модели электродинамического уровня системы БПЭ [9 – 11]. Получены выходные уравнения системы БПЭ, по которым были определены ее параметры, описывающие внесистемное взаимодействие и внутрисистемные процессы.

Таким образом, полученные в совокупности результаты в настоящей работе и [9 – 11] позволяют разработать общий вычислительный алгоритм анализа на электродинамическом уровне систем БПЭ, в которых могут применяться различные технологии передачи энергии [5].

Список литературы:

1. Shinohara N. Wireless power transfer via radiowaves. John Wiley & Sons, 2014. 238 p.
2. Nikolettseas S., Yang Y., Georgiadis A. Wireless power transfer algorithms, technologies and applications in ad hoc communication networks. Springer International Publishing, 2016. 745 p.
3. Gretsikh D.V., A.V. Gomozov, N.M. Tsikalovskiy, E.V. Sharapova. The radio frequency power supply system for unmanned-aerial vehicles // 10-th International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT). 2015. P. 202–204.
4. Gretsikh D.V., Gomozov A.V., Luchaninov A.I., Nesterenko M.V. Mathematical model of large aperture rectenna lattice // XX1st International semi-nar/workshop on direct and inverse problems of electromagnetic and acoustic wave theory (DIPED). 2016. P. 92–94.
5. Грецких Д.В., Цикаловский Н.М., Гладченко Е.И. Применение и перспективы развития беспроводной передачи энергии микроволновым лучом // Радиотехника. 2016. № 184. С. 7 – 25.
6. Грецких Д.В., Гомозов А.В., Цикаловский Н.М., Аль-Самарай Ш.Ф.А. Области применения и современные тенденции развития наноректенн // Технология приборостроения. 2012. № 2. С. 36–42.
7. Shi Y., Jing J., Fan Y., Yang L., Wang M. Design of a novel compact and efficient rectenna for WiFi energy harvesting // Progress in electromagnetics research C. 2018. Vol. 83. P. 57–70.

8. Sun H., Geyi W. Optimum design of wireless power transmission systems in unknown electromagnetic environments // *IEEE Acces*. 2017. P. 1–9.
9. Gretskih D.V., Luchaninov A.I., Vishniakova J.V., Katrich V.A., Nesterenko M.V. Electrodynamic model of a wireless power transmission system // *XXIIIrd International Seminar / Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory (DIPED)*. 2018. P. 80–85.
10. Luchaninov A.I., Gretskih D.V., Gomofov A.V., Katrich V.A., Nesterenko M.V. Electrodynamic approach to designing WPT systems with accounting for non-system interactions // *IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*. 2019. P. 80–85.
11. Gretskih D., Luchaninov A., Katrich V., Nesterenko M. Electrodynamic approach to designing wireless power transfer systems (Internal system processes) // *Fourth International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo)*. 2019.
12. Gomofov A.V., Shokalo V.M., Gretskih D.V., Al-Sammaraie Sh.F.A., Lukavenko O.S. Principles of construction and application of modern micro-wave wireless energy transmission systems // *Modern problems of radio engineering telecommunications and computer science (TCSET)*. 2012. P. 27–29.
13. Gretskih D.V., Gomofov A.V., Katrich V.A., Luchaninov A.I., Nesterenko M.V., Penkin Y.M. Mathematical model of large rectenna arrays for wireless energy transfer // *Electromagnetic waves: Progress In Electromagnetics Research B*. 2017. P. 77–91.
14. Шифрин Я.С., Лучанинов А.И. Антенны с нелинейными элементами // *Справочник по антенной технике*. Т.1. ; под. ред. Л.Д. Бахраха и Е.Г. Зелкина. Москва : ИПРЖР, 1997. С. 207–235.
15. Luchaninov A.I., Shifrin Y.S. Mathematical model of antenna with lumped nonlinear elements // *Telecommunications and Radio Engineering*. 2007. Vol. 66 (9). P. 763–803.

*Харьковский национальный
университет радиозлектроники*

Поступила в редколлегию 25.10.2019