

ВЕРОЯТНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АНСАМБЛЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ У ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ ОТ РЭС, ФУНКЦИОНИРУЮЩИХ НАД ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Канд. техн. наук МОРДАЧЕВ В. И.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Рост числа радиоэлектронных средств (РЭС) различного назначения, функционирующих на летательных аппаратах (ЛА) и искусственных спутниках Земли (ИСЗ), а также увеличение количества эксплуатируемых ЛА и ИСЗ во всех странах определяет увеличение опасности непреднамеренных радиопомех от этих РЭС, располагаемым на земной поверхности РЭС различных служб. Это в первую очередь касается наземных РЭС фиксированной (радиорелейные станции и линии, системы широкополосного беспроводного доступа), радиоастрономической, радиолокационной и спутниковой служб (земные станции спутниковой связи), поскольку ряд полос частот, выделенных этим службам на первичной основе, используется также другими радиосистемами и радиослужбами (служба космической эксплуатации «Космос – Земля», радионавигационная воздушная и спутниковая (активная) метеорологическая спутниковая, спутниковая служба ис-

следования Земли (активная), спутниковая подвижная «Космос – Земля», воздушная подвижная «Космос – Земля» и т. п.) [1]. Ансамбли радиосигналов (радиопомех), образуемые электромагнитными излучениями (ЭМИ) РЭС ЛА

и ИСЗ на земной поверхности, обладают рядом особенностей, которые следует учитывать при обеспечении электромагнитной совместимости (ЭМС) этих РЭС с наземными РЭС. С увеличением высоты размещения РЭС над земной поверхностью энергетика их ЭМИ у поверхности уменьшается, что также в целом влечет снижение вероятного динамического диапазона сигналов в произвольно выбранной точке поверхности. Вместе с тем, с увеличением высоты подъема РЭС значительно увеличивается зона прямой видимости и соответственно число посторонних радиосигналов на входах радиоприемных устройств (РПУ) наземных РЭС, по уровню превышающих порог восприимчивости

РПУ. Опасность поражения наземных РЭС помехами от РЭС ЛА и ИСЗ в значительной мере зависит и от угла места направления ориентации антенн наземных РЭС.

Исходные модели и соотношения. В основу подхода к статистическому моделированию электромагнитной обстановки (ЭМО) может быть положена методика [2–5], предполагающая случайное равномерное размещение источников ЭМИ равной эквивалентной изотропно излучаемой мощности (ЭИИМ) в некотором слое над плоской поверхностью и использующая модель распространения радиоволн (РРВ) в виде гиперболической зависимости плотности потока мощности ЭМИ Π от расстояния R до его источника:

$$\Pi = \frac{C_v P_{etr}}{R^v}; \quad C_v = \text{const}; \quad v = 2, \quad (1)$$

где P_{etr} – эквивалентная изотропно излучаемая мощность (ЭИИМ); C_v – константа, v – параметр, определяющий «скорость» затухания электромагнитного поля по мере увеличения расстояния до источника ЭМИ. В частности, $v = 2$ при РРВ в свободном пространстве; $v = 4$ при РРВ с интерференцией прямого и отраженного лучей в дальней зоне [3–8].

Для плоской модели земной поверхности в [2–4] определены следующие модели.

1. Модель пространственной области потенциального мешающего взаимодействия РЭС в виде области радиусом

$$R_{\max} = \left(C_v P_{etr} / \Pi_{\min} \right)^{1/v} \quad (2)$$

вокруг точки размещения на поверхности РЭС – рецептора помех, порог восприимчивости которого равен Π_{\min} .

2. Плотность распределения вероятности удаленности РЭС-источника ЭМИ от РЭС-рецептора помехи, если РЭС-источники помех располагаются случайно равномерно в некотором тонком слое на высоте H над земной поверхностью:

$$w(R) = \frac{2R}{R_{\max}^2 - H^2}, \quad H \leq R \leq R_{\max}. \quad (3)$$

3. Плотность распределения вероятности $w(\Pi)$ плотности потока мощности сигналов в точке размещения РЭС-рецептора помех на плоской поверхности:

$$w(\Pi) = \frac{2\Pi_{\min}^{2/v} \Pi_{\max}^{2/v}}{v(\Pi_{\max}^{2/v} - \Pi_{\min}^{2/v})\Pi^{(2+v)/v}}; \quad (4)$$

$$\Pi \in [\Pi_{\min}, \Pi_{\max}], \quad \Pi_{\max} = \frac{C_v P_{etr}}{R_{\min}^v},$$

где R_{\min} – минимальное расстояние до ближайшего РЭС-источника ЭМИ, дополнительно введенное в [2] искусственное ограничение на минимально возможное расстояние до ближайшего источника ЭМИ, обеспечивающего существование начальных и центральных моментов распределения (4). В рассматриваемом случае $R_{\min} = H$; при отсутствии этого ограничения (точка наблюдения находится на одной плоскости с источниками помех):

$$w(\Pi) = \frac{2\Pi_{\min}^{2/v}}{v\Pi^{(2+v)/v}}, \quad \Pi \geq \Pi_{\min}. \quad (5)$$

4. Плотность распределения вероятности угла места наблюдения источников ЭМИ, размещенных равномерно слоем над плоской поверхностью, из точки на поверхности [3, 4]:

$$w_p(\beta) = \frac{2}{\text{ctg}^2 \beta_{\min}} \frac{\cos \beta}{\sin^3 \beta}, \quad \beta \in \left[\beta_{\min}, \frac{\pi}{2} \right]. \quad (6)$$

5. Если в пространстве над земной поверхностью задана функция $\rho(\beta, R)$ средней плотности случайного пространственного размещения источников помех, равной эквивалентной излучаемой мощности от угла места и расстояния по отношению к точке наблюдения (размещения РПУ) на поверхности, то при свободном РРВ совместная плотность распределения вероятности помех в точке наблюдения по углу места и плотности потока мощности определяется соотношением [3, 4]:

$$w(\beta, \Pi) = \frac{C_n \cos \beta}{\Pi^{5/2}} \rho \left(\beta, R = \sqrt{\frac{C_v P_{etr}}{\Pi}} \right), \quad v = 2, \quad (7)$$

где C_n – нормирующий множитель.

Непосредственное использование этих моделей для описания статистических характе-

ристик ЭМО на земной поверхности от РЭС, располагаемых на значительной высоте над поверхностью, когда кривизной земной поверхности и высотой РЭС-источников помех пренебречь нельзя, без должного обоснования представляется некорректным. Данная работа посвящена уточнению вида моделей (3)–(7), учитывающих кривизну земной поверхности в зоне прямой видимости и высоту точки наблюдения над поверхностью.

Статистические характеристики ансамбля сигналов по энергетическому параметру и углу места направления прихода. Рассмотрим случай, когда в точке наблюдения, расположенной на земной поверхности (точка F на рис. 1), присутствует ансамбль электромагнитных полей, создаваемых источниками ЭМИ, располагаемыми случайно равномерно в некотором слое на высоте H над земной поверхностью. Часть этого слоя, попадающая в зону прямой видимости из точки F , образует шаровой сегмент, часть $ABCD$ которого присутствует на рис. 1. Будем полагать, что на сферической поверхности этого шарового сегмента случайно равномерно с плотностью ρ [ед./км²] размещены РЭС-источники ЭМИ. Применительно к этим условиям определим вид распределений плотности вероятности функционально связанных сферических координат β , R источников ЭМИ по отношению к точке наблюдения на сферической поверхности Земли и вид плотности распределения вероятности электромагнитных полей этих источников по энергетическому параметру Π в указанной точке.

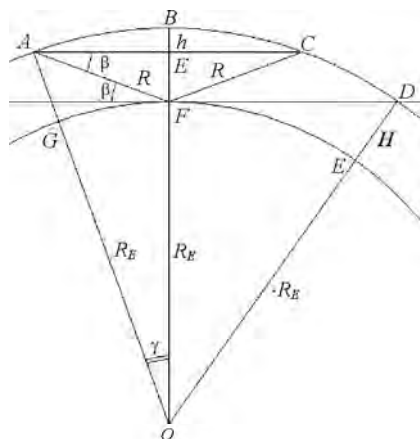


Рис. 1. H – высота слоя источников ЭМИ над земной поверхностью; β – угол места; R_E – эквивалентный радиус Земли (с учетом рефракции)

При $\rho = \text{const}$ эти распределения могут быть определены через закон распределения $w(\gamma)$ следующим образом:

$$w(\gamma) = \frac{1}{N_0} \left| \frac{dN(\gamma)}{d\gamma} \right| = \frac{R_E + H}{H} \sin \gamma, \quad (8)$$

$$0 \leq \gamma \leq \arccos \frac{R_E}{R_E + H},$$

где $N(\gamma)$ – среднее число источников ЭМИ, размещаемых с плотностью ρ на поверхности ABC шарового сегмента с высотой $h = h(\gamma)$, ограничиваемого углом γ ;

$$N(\gamma) = 2\pi R_E h(\gamma) \rho;$$

$$\gamma = \arccos \left(\frac{H^2 - R^2}{R_E + H} \right);$$

$$\gamma = \arccos \left(1 + \frac{R_E (1 - \sin^2 \beta) + \sqrt{R_E^2 \sin^4 \beta + H (2R_E + H) \sin^2 \beta}}{2R_E (R_E + H)} \right) \rightarrow \dots$$

$$w(R) = w(\gamma = \Phi^{-1}(R)) \left| \frac{d\gamma}{dR} \right| = \frac{R}{HR_E}, \quad (9)$$

$$H \leq R \leq \sqrt{H(2R_E + H)},$$

где $\gamma = \Phi^{-1}(R)$ – функция, обратная (8); откуда при РРВ в свободном пространстве

$$w(\Pi) = w(R = \Phi^{-1}(\Pi)) \left| \frac{dR}{d\Pi} \right| = \frac{Q}{\Pi^2}, \quad (10)$$

$$\Pi_{\min} \leq \Pi \leq \Pi_{\max};$$

$$\Pi_{\min} \geq \frac{P_{etr}}{4\pi H (2R_E + H)}; \quad \Pi_{\max} = \frac{P_{etr}}{4\pi H^2};$$

$$Q = \frac{\Pi_{\min} \Pi_{\max}}{\Pi_{\max} - \Pi_{\min}}.$$

Здесь Q – нормирующий коэффициент; $R = \Phi^{-1}(\Pi)$ – функция, обратная (1) при $\nu = 2$. В рассматриваемом случае при относительно небольших высотах, не превышающих высот

установившегося полета самолетов, $\Pi_{\max} \gg \Pi_{\min}$ и $Q \approx \Pi_{\min}$. Далее:

$$w_s(\beta) = w(\gamma = \Phi^{-1}(\beta)) \left| \frac{d\gamma}{d\beta} \right| = \frac{R_E + H}{H} (D_1(\beta) + D_2(\beta)), \quad 0 \leq \beta \leq \frac{\pi}{2}; \quad (11)$$

$$D_1(\beta) = -\frac{R_E \sin 2\beta}{R_E + H};$$

$$D_2(\beta) = \frac{(R_E^2 \sin^2 \beta + X) \sin 2\beta}{2(R_E + H) \sqrt{X \sin \beta}};$$

$$X = R_E^2 \sin^2 \beta + 2R_E H \sqrt{H^2}.$$

Нетрудно убедиться, что распределение (9) по виду совпадает с распределением (3), а распределение (10) – с распределением (4). Откуда следует принципиально важный вывод о том, что вид распределений (9), (10) инвариантен к кривизне земной поверхности и к высоте слоя, в котором размещаются РЭС-источники ЭМИ, над поверхностью; высота области размещения РЭС-источников ЭМИ лишь определяет границы областей существования распределений (9), (10).

Этот вывод существенно расширяет области применения базовых моделей (3), (4) статистической теории ЭМС [1], где эта модель использована для описания статистических характеристик ЭМО в точке на плоской поверхности от размещенных на этой поверхности РЭС-источников ЭМИ. Введенное в [1] искусственное ограничение на минимально допустимое расстояние от точки наблюдения до ближайшего РЭС-источника ЭМИ, существенно ослабляющее адекватность модели для случаев совпадения (пересечения) областей возможного пространственного размещения точки наблюдения и РЭС-источников ЭМИ, в рассматриваемом случае приобретает естественный характер: минимальное расстояние до ближайшего РЭС-источника ЭМИ может быть принято равным высоте H области размещения источников (слоя РЭС-источников ЭМИ) над земной поверхностью.

Полученное распределение (11) для угла места β , выраженного в радианах, является достаточно сложным и громоздким, однако во многих случаях вместо модели (11) может использоваться более простая модель (6). Эта замена особенно эффективна для значений H , не превышающих высот полета самолетов, т. е. для точки размещения РЭС-рецептора помех не более 10–20 км над земной поверхностью. Однако модель (6) может быть использована для оценочных расчетов и при значениях H , соответствующих орбитам большинства ИСЗ (100 км < H < 1000 км). Возникающие при использовании модели (6) погрешности оказываются приемлемыми при введении следующих ограничений на область определения величины β :

$$\beta_{\min}(H) \leq \beta \leq 90^\circ; \quad (12)$$

$$\beta_{\min}(H) = 1,35^{2,54 \lg H + 2,65}, \quad 0,1 \text{ км} \leq H < 100 \text{ км};$$

$$\beta_{\min}(H) = 1,33^{2,5 \lg H + 3,1}, \quad 100 \text{ км} < H \leq 1000 \text{ км}.$$

Вид зависимости $\beta_{\min}(H)$, на отдельных участках аппроксимируемой соотношениями (12), приведен на рис. 2.

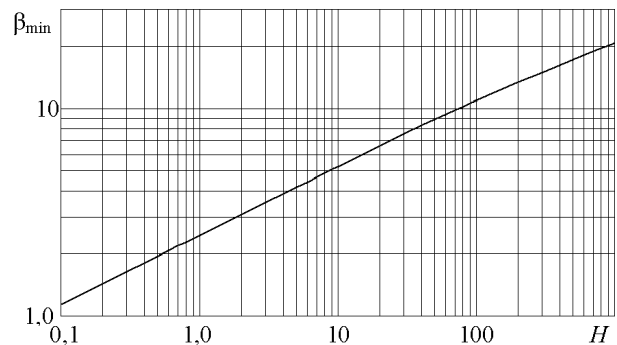
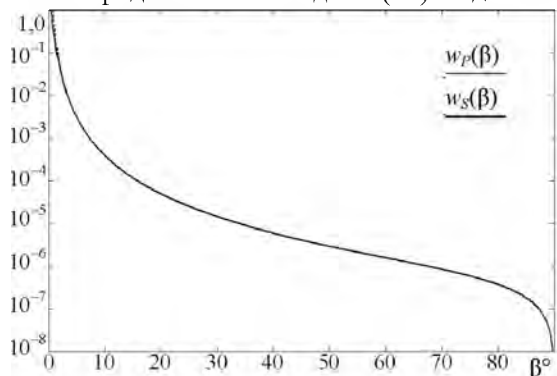


Рис. 2

На рис. 3–6 приведены расчетные кривые распределений (6), (11) для различных значений высоты H слоя РЭС-источников ЭМИ над земной поверхностью при $R_E = 8500$ км (с учетом рефракции) и для различных значений левой границы области определения аргумента в (6). На этих рисунках сплошная линия соответствует модели (6), прерывистая линия – модели (11). На правых частях рисунков приведены зависимости отношения $w_s(\beta)/w_P(\beta)$ от уг-

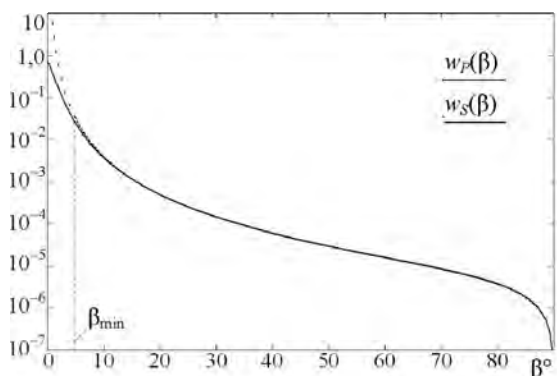
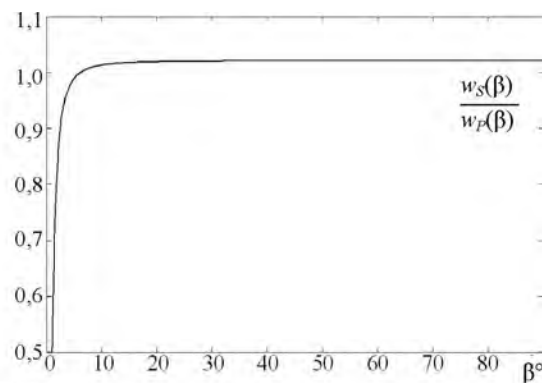
лов визирования, позволяющие оценить погрешность представления модели (11) моделью

(б) при различных β и H .



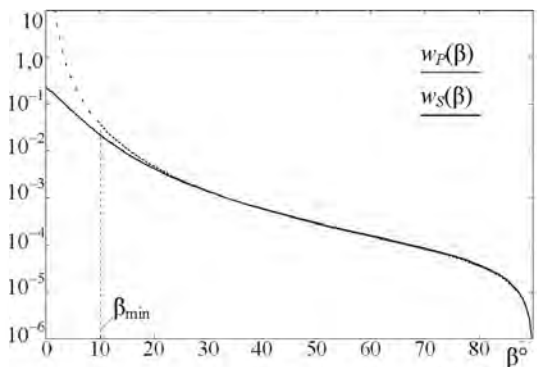
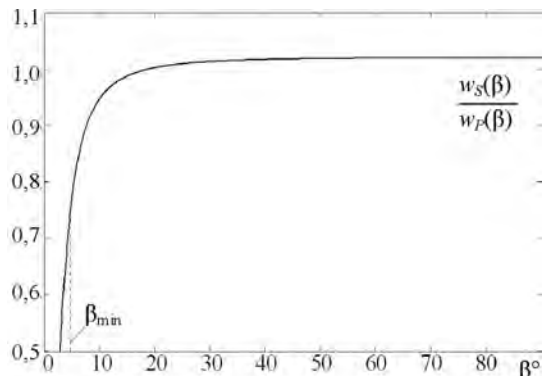
$H = 1$ км; $\beta_{\min} = 2,22^\circ$

Рис. 3



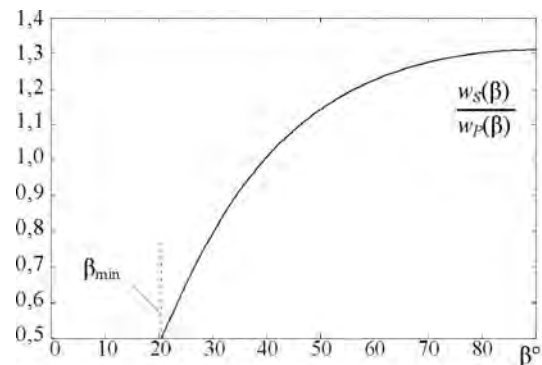
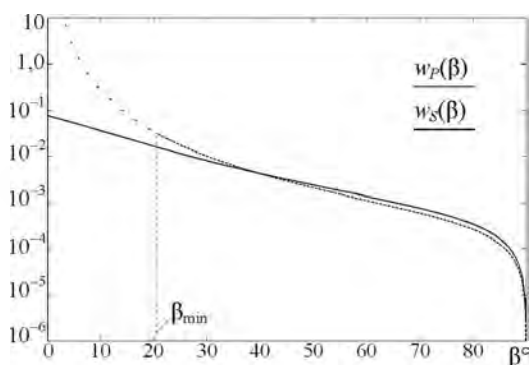
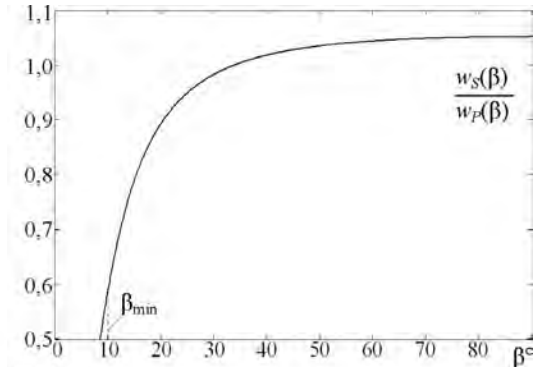
$H = 10$ км; $\beta_{\min} = 4,76^\circ$

Рис. 4



$H = 100$ км; $\beta_{\min} = 10,14^\circ$

Рис. 5



$$H = 1000 \text{ км; } \beta_{\min} = 20,34^\circ$$

Рис. 6

ВЫВОДЫ

Сравнительный анализ моделей (6) и (11) на основе данных рис. 2–6 позволяет сделать следующие выводы:

1. В области $[\beta_{\min}, \pi/2]$, определяемой с использованием (12), погрешность представления модели (11) моделью (6) не превышает 3дБ.

2. На высотах не более 1–2 км, соответствующих высотам полета малой авиации (включая вертолеты), модель (6) хорошо совпадает

с моделью (11) практически во всем диапазоне возможных значений угла места направления прихода помехи, за исключением области 1° – 2° вблизи горизонта.

3. Применение модели (6) при высотах точки наблюдения, соответствующих диапазону высот установившегося полета современных пассажирских и транспортных самолетов, возможно при углах места не менее 5° , соответствующих рабочему диапазону углов места ориентации антенн земных станций спутниковой связи.

4. В области $[(1,5-2,0)\beta_{\min}, \pi/2]$ подбором величины β_{\min} для каждого значения H можно добиться практически полного совпадения моделей (6) и (11).

5. Приведенные соображения в силу дуализма рассматриваемой задачи справедливы и для «обратной» ситуации, когда в слое над поверхностью земли размещаются случайным образом РЭС-рецепторы помех с порогом восприимчивости Π_{\min} , а на земной поверхности в точке наблюдения располагается РЭС-источник помех. Применительно к этой ситуации модели (6), (11) соответственно приближенно и точно описывают плотность распределения вероятностей угла места произвольно выбранного РЭС-рецептора помех по отношению к точке наблюдения, в которой расположен РЭС-источник ЭМИ.

6. Модель (6) применима в области $[\beta_{\min}, \pi/2]$ для оценки ЭМС РЭС, функционирующих с углами места ориентации антенн более $\beta_{\min} + \Delta\beta/2$, где $\Delta\beta$ – ширина диаграммы направленности антенны РЭС в вертикальной плоскости (земные станции спутниковой связи, радиолокационные станции и т. п.), однако она неприменима при решении задач ЭМС РЭС,

функционирующих с нулевыми либо малыми углами места ориентации антенн, в частности радиорелейных станций и систем фиксированной радиосвязи, поскольку в области $[0, \beta_{\min}]$ модель (6) не существует.

7. Модель (7) совместной плотности распределения $w(\beta, \Pi)$ вероятностей угла места и плотности потока мощности источников ЭМИ по отношению к точке наблюдения на земной поверхности позволяет определить статистические характеристики ансамбля сигналов, образующих ЭМО в точке наблюдения, при произвольном виде зависимости средней пространственной плотности $\rho(\beta, R)$ случайного пространственного размещения источников помех равной ЭИИМ от угла места и расстояния по отношению к точке наблюдения. Это имеет существенный практический интерес, поскольку с увеличением высоты слоя источников ЭМИ над поверхностью и соответствующим расширением границ области прямой видимости и/или области потенциального мешающего взаимодействия РЭС возможности использования допущения о близком к равномерному случайном пространственном размещении РЭС-источников ЭМИ ($\rho(\beta, R) = \rho = \text{const}$) в ряде случаев становятся менее очевидными. С другой стороны, использование 3D технологий позволяет определить функцию $\rho(\beta, R)$ для значительных территорий с учетом границ транзитных авиакоридоров, зон интенсивной эксплуатации легкомоторной авиации и вертолетов. Тем не менее модель (7) отличается сложностью в практическом использовании, что определяет полезность ее частного вида (11) и аппроксимации (6).

8. Модель (10) получена в предположении равенства ЭИИМ РЭС-источников ЭМИ, располагаемых слоем над земной поверхностью. При наличии в этом слое нескольких групп РЭС с различной ЭИИМ модель $w(\Pi)$ может быть определена в виде взвешенной суммы моделей (10) для каждой группы РЭС. В частности, этот принцип позволяет определить вид $w(\Pi)$ и при использовании в РЭС-источниках ЭМИ направленных антенн.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сборник рабочих материалов по международному регулированию планирования и использования радиочастотного спектра – Т. 1: Регламент радиосвязи. – М.: Гейзер, 2004.

2. Апорович, А. Ф. Статистическая теория электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств / А. Ф. Апорович. – Минск: Наука и техника, 1984. – 215 с.

3. Мордачев, В. И. Статистические характеристики электромагнитной обстановки в рассредоточенных группировках РЭС: науч.-техн. отчет инв. № 02880034534. – Минск: МРТИ, 1987.

4. Мордачев, В. И. Типовые модели электромагнитной обстановки при рассредоточенном пространственном размещении источников / В. И. Мордачев // Тр. X Междунар. Вроцлавского симпозиума по электромагнитной совместимости. Июнь 1990 г. – С. 409–414.

5. Мордачев, В. И. Статистические характеристики динамического диапазона непреднамеренных помех при

рассредоточенном пространственном группировании их источников / В. И. Мордачев // Тр. IX Междунар. Вроцлавского симпозиума по электромагнитной совместимости. Июнь 1988 г. – С. 571–576.

6. Mordachev, V. Radiosignals Dynamic Range in Space-Scattered Mobile Radiocommunication Networks / V. Mordachev // 15th Intern. Wroclaw Symp. on EMC, Poland, Wroclaw, June 27–30, 2000. – P. 331–335.

7. Mordachev, V. Mathematical Models for Radiosignals Dynamic Range Prediction in Space-Scattered Mobile Radiocommunication Networks / V. Mordachev // The IEEE Semi Annual VTC Fall 2000, Boston, Sept. 24–28. – 2000. – 8 p.

8. Rappaport, T. S. Wireless Communications: Principles and Practice / T. S. Rappaport. – Prentice Hall, Upper Saddle River, 2002.

Поступила 21.11.2008

УДК 621.791

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОУПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Авт. НЕДВЕЦКИЙ Н. С.

Белорусский национальный технический университет

Большое разнообразие технологических процессов, используемых в промышленности, требует соответствующего разнообразия методов управления ими. На практике среди традиционных схем управления выделяются пропорциональное (П), пропорционально-интегральное (ПИ) и пропорционально-интегрально-дифференциальное (ПИД) управление [1], управление с самонастройкой, ПИД-управление с самонастройкой, обобщенное прогнозирующее (ОП) управление и управление на базе нечеткой логики (НЛ). Наибольшее распространение в промышленности получили ПИД-контроллеры, имеющие простую структуру и высокую надежность. Применение ПИД-регулирования не требует знания точной модели процесса. Однако такие контроллеры обладают и существенными недостатками:

- ПИД-контроллер не обеспечивает оптимальную характеристику для процессов с переменными параметрами и существенными нелинейностями;

- настройка параметров производится вручную для каждой рабочей точки технологического процесса;

- имеется существенная чувствительность к возмущениям входного сигнала.

Для многих динамических процессов, характеризующихся многомерностью и нелинейностью параметров, классические методы не обеспечивают требуемой точности управления. Поэтому для управления ими используют контроллеры с регулированием на основе НЛ. Однако для систем с одновременным сочетанием нечеткости и неопределенности параметров и такие регуляторы оказываются малоэффективными.

Многие реальные системы включают в себя нелинейные характеристики процессов, сложные для моделирования динамические элементы, неконтролируемые шумы и помехи и другие факторы, затрудняющие реализацию управления. Современная теория управления базируется на принципах линеаризации системы, что на практике приводит к необходимости предварительной разработки математических