

**МОДЕЛЬ РОЗРАХУНКУ КІЛЬКІСНИХ ПОКАЗНИКІВ
ДОДАТКОВИХ ВТРАТ В КАНАЛІ РАДІОЗВ'ЯЗКУ**

У статті запропонована формула для визначення додаткових втрат (завмирань) сигналу в середовищі розповсюдження радіохвиль на виході радіоприймача каналу радіозв'язку, яка може бути використана в системах радіозв'язку для врахування впливу завмирань та подальшої їх компенсації.

Ткаченко А.Л., Троцик С.Н., Лиманская А.Л., Гуржий И.А. Определение количественных показателей замираний в канале радиосвязи. В статье предложена формула для определения дополнительных потерь сигнала в среде распространения радиоволн на выходе радиоприемника канала радиосвязи, которая может быть использована в системах радиосвязи для учета влияния замираний и дальнейшей их компенсации.

A. Tkachenko S. Trotsik, A. Limanskaya, I. Gurzhiy Determination of quantitative indicators of radio channel fading. The article proposes a formula for determining fading in the medium of radio waves propagation at the output of the radio receiver of the radio communication channel, which can be used in radio communication systems for recording and compensation of the fading quantitative indices.

Ключові слова: завмирання, канал зв'язку, потужність, загасання, опір вхідного каскаду, коефіцієнт підсилення.

Постановка завдання. Прийом радіосигналів практично завжди здійснюється в присутності дестабілізуючих факторів, зокрема завад різного походження, завмирань, температурного дрейфу, атмосферних явищ та ін., що призводить до додаткових втрат рівня сигналу в каналі радіозв'язку. В ряді випадків для якісного прийому радіосигналів в радіоканалі зв'язку організовують зворотній радіоканал для управління потужністю випромінювання радіопередавача, що може суттєво зменшити, або повністю компенсувати вплив вказаних факторів на якість радіоприйому. Зворотній канал разом з основним радіоканалом утворюють замкнуту систему автоматичного регулювання потужністю передавача (систему АРПП), яка використовує метод адаптивного прийому.

Застосування системи АРПП для радіорелейного або тропосферного радіозв'язку (як правило, систем з фіксованою дальністю між передавачем та приймачем) дозволяє суттєво зменшити середню потужність випромінювання, підвищити прихованість зв'язку та електромагнітну сумісність [1 – 8]. Адаптивний прийом сигналів заснований на можливості вимірювання характеристик каналу передачі та використанні отриманих даних для регулювання параметрів сигналу в передавачі.

Аналіз останніх публікацій. Дослідженню впливу завмирань сигналів в системах радіозв'язку присвячено цілий ряд робіт, а саме: О.І. Калініна, В.Н. Троїцького, Л.В. Надененко, В.В. Святогора, Г.О. Василенко [9 – 13], а також: M. Glauner, R.L. Olsen, T. Tjelta, I. Henne, P. Thorvald-sen, J. Henriksson [14 – 17]. Розроблено велику кількість моделей розповсюдження радіохвиль в умовах багатоприменовості, зокрема моделі: Okumura, Nata, ITU (CCIR), Lee та інші, які дозволяють оцінити потенційні втрати сигналу на етапі проектування зони покриття (обслуговування). На етапі практичної експлуатації, доцільно мати можливість визначення кількісних показників додаткових втрат для забезпечення роботи системи АРПП. Крім того, це дозволить здійснювати аналіз статистичних даних, що характеризують випадкові зміни рівня радіосигналу на виході приймача радіостанції, як з точки зору рекомендацій щодо вибору висот підвісу антен на інтервалах, так і з точки зору оцінки показників якості передачі.

Метою статті є розробка моделі розрахунку рівня сигналу на виході приймача для застосування у схемі автоматичного регулювання потужністю передавача перспективних засобів радіорелейного та тропосферного зв'язку.

Виклад основного матеріалу. Рівень сигналу на вході радіоприймача, за умови, що замирання та інші перешкоди в радіоканалі відсутні, дорівнює

$$P_{\text{прм[дБ]}} = 10 \lg \left(\frac{P_{\text{прм[Вт]}}}{1 \text{ Вт}} \right) = P_{\text{прд[дБ]}} + G_{\text{Апрд[дБ]}} + G_{\text{Апрм[дБ]}} - L_{\text{о[дБ]}}, \quad (1)$$

де, $P_{\text{прд[дБ]}} = 10 \lg \left(\frac{P_{\text{прд[Вт]}}}{1 \text{ Вт}} \right)$ – потужність передавача, $G_{\text{Апрд[дБ]}}$ і $G_{\text{Апрм[дБ]}}$ – коефіцієнти підсилення відповідно передавальної та приймальної антен з урахуванням втрат у фідерних трактах передавача та приймача, $L_{\text{о[дБ]}}$ – загасання сигналу у вільному просторі, яке визначається за

формулою
$$L_{\text{о[дБ]}} = 10 \lg \left(\frac{4\pi D}{\lambda} \right)^2. \quad (2)$$

Потужність сигналу на вході радіоприймача, яка визначається формулою (1) (за умови, що замирання та інші перешкоди в радіоканалі відсутні), позначимо як $P_{\text{о[дБ]}}$ або $P_{\text{о[Вт]}}$.

Дамо наступне визначення замирань. Замирання – це фізичні явища, які призводять до зміни (в основному, до зменшення) потужності на вході радіоприймального пристрою каналу радіозв'язку від розрахункової потужності, заданої рівнянням передачі (1), що зв'язує потужності на виході радіопередавального і на вході радіоприймального пристрою цього радіоканалу. Радіопередавальний пристрій включає генератор електромагнітних коливань, антено-фідерний тракт і передавальну антену. Радіоприймальний пристрій включає приймальну антену, антено-фідерний тракт і приймальний пристрій.

Для визначеного радіоканалу його параметри (потужність передавача $P_{\text{прд[дБ]}}$, довжина хвилі коливань несучої частоти λ , відстань між передавачем та приймачем D , коефіцієнти підсилення передавальної та приймальної антен з урахуванням втрат у фідерних трактах передавача та приймача $G_{\text{Апрд[дБ]}}$, $G_{\text{Апрм[дБ]}}$) є відомими величинами, тому на підставі формули (1) можна розрахунковим шляхом визначити потужність сигналу на вході радіоприймача $P_{\text{прм[дБ]}} \equiv P_{\text{о[дБ]}}$ або $P_{\text{прм[Вт]}} \equiv P_{\text{о[Вт]}}$.

При відомих входньому опорі входного каскаду радіоприймача R та коефіцієнті підсилення приймача $K_{\text{прм}}$, напруга на вході радіоприймача визначається як:

$$U_{\text{вх[В]}} = \sqrt{P_{\text{прм}} \cdot R},$$

а напруга на виході радіоприймача буде становити:

$$U_{\text{вих}} = K_{\text{прм}} \sqrt{P_{\text{прм}} \cdot R}. \quad (3)$$

Прийmemo вихідну напругу радіоприймача як напругу уставки $U_{\text{о}}$ (це напруга, при якій замирання та інші перешкоди в радіоканалі відсутні і по радіоканалу проходить якісна інформація), тобто:

$$U_{\text{о}} = K_{\text{прм}} \sqrt{P_{\text{о}} \cdot R}.$$

Якщо в каналі радіозв'язку з'явилися замирання, які привели до додаткового загасання потужності на $L_{\text{дод[дБ]}}$, то тоді потужність сигналу на вході радіоприймача дорівнює:

$$P_{\text{прм}} = P_{\text{прд}} + G_{\text{Апрд}} + G_{\text{Апрм}} - L_{\text{о}} - L_{\text{дод}},$$

або

$$P_{\text{прм}} = P_{\text{о}} - L_{\text{дод}}. \quad (4)$$

З формули (4) знаходимо додаткове загасання потужності $L_{\text{дод[дБ]}}$, яке визначається як:

$$L_{\text{дод}} = P_{\text{прм}} + P_0.$$

Враховуючи, що на основі формули (3) $P_{\text{прм}} = \frac{U_{\text{вих}}^2}{K_{\text{прм}}^2 \cdot R}$ отримуємо остаточну формулу

для визначення завмирань в середовищі розповсюдження радіохвиль на виході радіоприймача каналу радіозв'язку:

$$L_{\text{дод}} = \frac{U_{\text{вих}}^2}{K_{\text{прм}}^2 \cdot R} + P_0. \quad (5)$$

Як приклад проведемо розрахунок енергетики прямого тракту системи автоматичного регулювання потужності передавача [18]. Припустимо, що вхідний опір вхідного каскаду приймача $r = 25 \text{ Ом}$, коефіцієнт підсилення приймача $K_{\text{прм}} = 200$.

Нехай потужність радіопередавача у [Вт]: $P_{\text{прд}} = 50 \text{ Вт}$. Тоді потужність радіопередавача в дБ/Вт:

$$P_{\text{прд}} = 10 \lg \left(\frac{P_{\text{прд}}[\text{Вт}]}{1 \text{ Вт}} \right) \cong 17 \text{ дБ}.$$

Припустимо, що коефіцієнт підсилення передавальної та приймальної антен з урахуванням втрат у фідерних трактах передавача і приймача мають значення: $G_{A_{\text{прд}}} + G_{A_{\text{прм}}} = 24 + 24 = 48 \text{ дБ}$, а загасання сигналу на радіолінії, що визначається за формулою (1) дорівнює 125 дБ. Тоді потужність сигналу на вході радіоприймача, за умови, що завмирання та інші перешкоди в радіоканалі відсутні, дорівнює:

$$P_{\text{прм}} = P_{\text{прд}} + G_{A_{\text{прд}}} + G_{A_{\text{прм}}} - L_0 = 17 + 24 + 24 - 125 = -60 \text{ дБ} = 10 \lg \left(\frac{P_{\text{прм}}[\text{Вт}]}{1 \text{ Вт}} \right).$$

Звідси $\lg \left(\frac{P_{\text{прм}}[\text{Вт}]}{1 \text{ Вт}} \right) = -6$, або $\frac{P_{\text{прм}}[\text{Вт}]}{1 \text{ Вт}} = 10^{-6}$. Тоді $P_{\text{прм}} = 10^{-6} \text{ Вт} = 1 \text{ мкВт}$.

Потужність сигналу на вході приймача, яка визначається цими формулами (за умови, що завмирання та інші перешкоди в радіоканалі відсутні), позначимо як $P_{0[\text{дБ}]}$ або $P_{0[\text{Вт}]}$. Отже, $P_0 = -60 \text{ дБ}$ або $P_0 = 1 \text{ мкВт}$.

Припустимо, що вхідний опір вхідного каскаду приймача $r = 25 \text{ Ом}$. Тоді напруга на вході приймача дорівнює:

$$U_{\text{вх}} = \sqrt{P_{\text{прм}}[\text{Вт}] \cdot R_{[\text{Ом}]}} = \sqrt{10^{-6} \cdot 25} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ В} = 5 \text{ мВ}.$$

При коефіцієнті підсилення приймача $K_{\text{прм}} = 200$ на виході приймача отримуємо $U_{\text{вих}} = 1 \text{ В}$. Прийемо цю напругу як напругу уставки $U_0 = 1 \text{ В}$.

Якщо з'явилися завмирання, які призвели до додаткового загасання потужності на $L_{\text{дод}} = 20 \text{ дБ}$, то тоді потужність сигналу на вході приймача дорівнює:

$$P_{\text{прм}}[\text{дБ}] = P_{\text{прд}}[\text{дБ}] + G_{A_{\text{прд}}}[\text{дБ}] + G_{A_{\text{прм}}}[\text{дБ}] - L_{0[\text{дБ}]} - L_{\text{дод}}[\text{дБ}] = -80 \text{ дБ} = 10 \lg \left(\frac{P_{\text{прм}}[\text{Вт}]}{1 \text{ Вт}} \right).$$

Звідси $\lg \left(\frac{P_{\text{прм}}[\text{Вт}]}{1 \text{ Вт}} \right) = -8$, або $\frac{P_{\text{прм}}[\text{Вт}]}{1 \text{ Вт}} = 10^{-8}$. Тоді $P_{\text{прм}} = 10^{-8} \text{ Вт} = 0,01 \text{ мкВт}$.

Напруга на вході приймача в цьому випадку дорівнює:

$$U_{\text{вх}}[\text{В}] = \sqrt{P_{\text{прм}}[\text{Вт}] \cdot R_{[\text{Ом}]}} = \sqrt{10^{-8} \cdot 25} = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ В} = 0,5 \text{ мкВ}.$$

При тому ж коефіцієнті підсилення приймача $K_{\text{прм}} = 200$ на виході приймача отримуємо $U_{\text{вих}} = 0,1 \text{ В}$. Таким чином, при завмираннях, які призвели до додаткового

загасання потужності на $L_{\text{дод}} = 20$ дБ, напруга на виході приймача зменшилася на $\Delta U_{\text{вих}} = 0,9$ В від напруги уставки $U_0 = 1$ В.

Вочевидь, знаючи величину $\Delta U_{\text{вих[В]}} = U_0 - U_{\text{вих[В]}}$, або величину $U_{\text{вих[В]}}$, відмінну від напруги уставки $U_0 = 1$ В, можливо визначити додаткове загасання потужності $L_{\text{дод}}$, викликане завмираннями. Наприклад, якщо напруга на виході приймача $U_{\text{вих}} = 0,6$ В, тобто $\Delta U_{\text{вих}} = 0,4$ В, то при коефіцієнті підсилення приймача $K_{\text{прм}} = 200$ напруга на його вході дорівнює: $U_{\text{вх}} = \frac{U_{\text{вих}}}{K_{\text{прм}}} = 3 \cdot 10^{-3}$ В.

Потужність сигналу на вході приймача дорівнює: $P_{\text{прм}} = \frac{U_{\text{вх}}^2}{R} = 0,36 \cdot 10^{-6}$ Вт, або

$$P_{\text{прм}} = 10 \lg \left(\frac{P_{\text{прм[Вт]}}}{1 \text{ Вт}} \right) = 10 \lg (0,36 \cdot 10^{-6}) = -64,437 \text{ дБ}.$$

Оскільки в даному прикладі потужність сигналу на вході приймача за відсутності завмирань в прямому каналі радіозв'язку дорівнює -60 дБ, то завмирання призвели до додаткового зменшення потужності на $L_{\text{дод}} = 4,437$ дБ.

Таким чином, при завмираннях, які призвели до додаткового загасання потужності на $L_{\text{дод}} = 4,437$ дБ, напруга на виході приймача зменшилася на $\Delta U_{\text{вих}} = 0,4$ В від напруги уставки $U_0 = 1$ В, а при завмираннях, які призвели до додаткового загасання потужності на $L_{\text{дод}} = 20$ дБ, напруга на виході приймача зменшилася на $\Delta U_{\text{вих}} = 0,9$ В від напруги уставки $U_0 = 1$ В. Для визначеного радіоканалу його параметри (потужність передавача $P_{\text{прд[дБ/Вт]}}$, довжина хвилі коливань несучої частоти λ , відстань між передавачем і приймачем D , коефіцієнти підсилення передавальної та приймальної антен з урахуванням втрат у фідерних трактах передавача та приймача $G_{A_{\text{прд[дБ]}}}$, $G_{A_{\text{прм[дБ]}}}$, вхідний опір вхідного каскаду приймача $R_{\text{Ом}}$, коефіцієнт підсилення приймача $K_{\text{прм}}$) є відомими величинами, тому формулу (5), що визначає зв'язок між напругою на виході приймача і величиною додаткового загасання потужності $L_{\text{дод}}$, можна записати в числовому вигляді. Для даного прикладу:

$$L_{\text{дод}} = -10 \lg (U_{\text{вих}}^2 \cdot 10^{-6}) - 60.$$

Результати розрахунків приведені в таблиці:

Таблиця 1

$U_{\text{вих[В]}}$	0,8	0,6	0,4	0,2	0,1	0,05	0,01
$L_{\text{дод[дБ]}}$	1,938	4,437	7,959	13,979	20	26,021	40

Висновок. Таким чином, запропонована модель розрахунку додаткових втрат дозволяє за вимірюваннями напруги на виході радіоприймача забезпечувати роботу системи автоматичного регулювання потужності передавача, а також здійснювати постійний контроль рівня впливу завмирань в середовищі розповсюдження радіохвиль та накопичення статистичних даних щодо додаткових втрат сигналу.

Напрямок подальших досліджень є оцінка ефективності запропонованої моделі розрахунку за допомогою імітаційного моделювання для різних каналів зв'язку.

ЛІТЕРАТУРА

1. Гостев В.И., Панченко И.В., Ткаченко А.Л. Модели аттенюатора как элемента системы автоматического регулирования мощности передатчика // Вісник Черкаського

державного технологічного університету. – 2007. – № 1–2. – С. 94 – 98.

2. Гостев В.И., Панченко И.В., Ткаченко А.Л. Применение цифровых регуляторов на базе аналоговых корректирующих устройств в статических системах АРМП // Вісник Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій. – 2007. – Т. 5, № 3. – С. 284 – 289.

3. Гостев В.И., Панченко И.В., Ткаченко А.Л. Проектирование нечеткого регулятора при выходных разъединенных на отрезок 1-2а треугольных функциях принадлежности // Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету ім. Т. Шевченка. – 2009. – № 17. – С. 102 – 106.

4. Гостев В.И., Ткаченко А.Л. Моделі атенюатора з урахуванням його реальних характеристик // Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення: IV науково-практичний семінар, 22 листопада 2007 р. : тези допов. – К., 2007. – С. 74.

5. Ткаченко А.Л. Определение управляющих воздействий на выходе нечеткого регулятора при идентичных сжатых треугольных функциях принадлежности // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций / РТ-2008 / : 4 міжнародна молодіжна науково-технічна конференція, 21-25 квітня 2008 р. : тези допов. – Севастополь, 2008. – С. 100.

6. Ткаченко А.Л. Системи автоматичного регулювання потужності передавача з ПІД-регулятором в каналі радіоуправління // Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення: IV науково-технічна конференція, 22 – 23 жовтня 2008 р. : тези допов. – К., 2008. – С. 275.

7. Ткаченко А.Л. Применение цифровых регуляторов на базе аналоговых корректирующих устройств в статических системах АРМП // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций / РТ-2009 / : 5 міжнародна молодіжна науково-технічна конференція, 20 – 25 квітня 2009 р. : тези допов. – Севастополь, 2009. – С. 108.

8. Ткаченко А.Л., Кашук В.И. Системы автоматической регулировки мощности передатчика с нечетким регулятором в канале радиоуправления // Перспективи розвитку озброєння і військової техніки Сухопутних військ: II Всеукраїнська науково-технічна конференція, 28 – 29 квітня 2009 р. : тези допов. – Львів, 2009. – С. 143

9. Калинин А.И., Черенкова Е.Л. Распространение радиоволн и работа радиолиний. М.: Связь, 1971. - 439 с.

10. Надененко Л.В., Святогор В.В., Ломоносова А.Г. Метод расчета статистики глубины многолучевых замираний на линиях прямой видимости // Труды НИИР. М.: НИИР, 2008. - № 3. - С. 80 - 86.

11. Надененко Л.В., Святогор В.В., Ломоносова А.Г. К расчету интенсивности отказов на цифровых линиях прямой видимости // Труды НИИР. М.: НИИР, 2009. - № 2. - С. 39 - 46.

12. Антипенко В.А., Василенко Г.О. Расчет показателей готовности трактов цифровых радиорелейных линий связи // Электросвязь. 2004. - № 12.

13. Василенко Г.О. Экспериментальная проверка методик расчета показателей качества и готовности цифровых радиорелейных линий // Радиотехника. 2011. - № 2. - С. 37 - 42.

14. Glauner M. A model for calculating the transmission performance of digital radio-relay systems. Telecommunication report, Bosch Telecom, vol. 11, March 1994, pp 13-22.

15. Olsen R.L., Tjelta T. Worldwide techniques for predicting the multipath fading distribution on terrestrial LOS links: Background and results of tests // IEEE Transactions on antennas and propagation, vol. 47, NO. 1, January 1999.

16. Henne I., Thorvaldsen P. Planning of line-of-sight radio relay systems. ABB Nera, June 1994. 151 p.

17. Столлингс В. Беспроводные линии связи и сети. : Пер. с англ. М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. - 640 с.

18. Гостев В.И. Нечеткие регуляторы в системах автоматического управления / В.И. Гостев. – К.: Радіоаматор, 2008. – 971 с.