

МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ СХЕМЫ СОГЛАСОВАНИЯ В BTS СИСТЕМЫ ИНТЕРВАЛЬНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ

Тасболатова Л.Т.¹, Орынбет М.М.²

¹докторант PhD, Satbayev University, Казахстан, Алматы, egao@inbox.ru

²ассоциированный профессор, Satbayev University, Казахстан, Алматы, orynbet.marat@mail.ru

Аннотация. Одной из главных задач при внедрении микропроцессорных систем интервального регулирования движения поездов (далее - СИРДП) является разработка мер, позволяющих выявить и измерить электромагнитные помехи, приводящие к нарушению архитектуры железнодорожного сообщения, что приводит к потенциальным рискам при эксплуатации железных дорог. В данной статье будет рассмотрена система передачи телеграм сигналов с бализ (напольные устройства) на бортовую систему, так как эта система служит для определения местоположения поезда и регулирования интервала следования поездов на участке. Будет построена модель эквивалентной схемы антенн передачи сигналов по восходящей линии между BTS (система передачи бализ) и бортовой системой, а также проведен анализ этой схемы согласования. Изучение данного вопроса связано с эксплуатацией таких систем на участках магистральной сети РК. В настоящее время системой интервального регулирования движения поездов на базе радиоканала СИРДП-Е оборудованы участки: Узень-Болашак, Жезказган-Саксаульская, Жетыген-Алтынколь, Аркалык-Шубарколь, Шалкар-Бейнеу.

Ключевые слова: системы железнодорожной автоматики и телемеханики, бализа, система передачи бализы, электромагнитная связь, взаимная индуктивность, СИРДП, антенна бализ

МОДЕЛДӨӨ ЖАНА ПОЕЗДДЕРДИН КЫЙМЫЛЫН ИНТЕРВАЛДЫК ЖӨНГӨ САЛУУ СИСТЕМАСЫНЫН BTS МАКУЛДАШУУ СХЕМАСЫН ТАЛДОО

Тасболатова Л.Т.¹, Орынбет М.М.²

¹докторант, Satbayev University, Казахстан, Алматы, egao@inbox.ru

²ассоциацияланган профессор, Satbayev University, Казахстан, Алматы, orynbet.marat@mail.ru

Аннотация. Поезддердин кыймылын интервалдык жөнгө салуунун микропроцессордук системаларын (мындан ары - СИРДП) киргизүүдөгү башкы милдеттердин бири темир жол катнашынын архитектурасынын бузулушуна алып келүүчү электр магниттик тоскоолдуктарды аныктоого жана өлчөөгө мүмкүндүк берүүчү чараларды иштеп чыгуу болуп саналат, бул темир жолдорду пайдаланууда потенциалдуу тобокелдиктерге алып келет. Бул макалада телеграмма сигналдарды балиден (пол түзмөктөрүнөн) борттук системага өткөрүү системасы каралат, анткени бул система поезддин жайгашкан жерин аныктоо жана сайтта тамак-аштын аралыгын жөнгө салуу үчүн кызмат кылат. Ими (бализ берүү системасы) жана борттук системанын ортосундагы Чыгыш линиялары боюнча сигналдарды берүү антенналарынын эквиваленттүү схемасынын модели курулат, ошондой эле бул макулдашуу схемасына талдоо жүргүзүлөт. Бул маселени изилдөө Казакстан Республикасынын магистралдык тармагында мындай системаларды пайдалануу менен

байланышқан. Азыркы учурда СИРДП-Е радиоканалынын базасында поезддердин кыймылын интервалдык жөнгө салуу системасы менен Узен-Болашак, Жезказган-Саксауль, жетим-Алтынколь, Аркалык-Шубарколь, Шалькар-Бейнеу участктору жабылган.

Өзөктүү сөздөр: темир жол автоматика жана телемеханика тутумдары, бализа, бализ берүү тутуму, электромагниттик байланыш, өз ара Индуктивдүүлүк, СИРДП, бализ антеннасы

MODELING AND ANALYSIS OF THE COORDINATION SCHEME IN THE BTS SYSTEM OF INTERVAL REGULATION OF TRAIN TRAFFIC

Tasbolatova L.T., Orynbet M.M.

¹PhD student, Satbayev University, Kazakhstan, Almaty, egao@inbox.ru

²Associate Professor, Satbayev University, Kazakhstan, Almaty, orynbet.marat@mail.ru

Abstract. One of the main tasks in the implementation of microprocessor systems for interval control of train traffic (hereinafter - SIRDP) is the development of measures to identify and measure electromagnetic interference that leads to disruption of the architecture of railway communication, which leads to potential risks in the operation of railways. This article will consider the system of transmitting telegram signals from baliz (floor devices) to the on-board system, since this system serves to determine the location of the train and regulate the travel interval on the section. A model of an equivalent antenna scheme for transmitting signals along the uplink between BTS (baliz transmission system) and the onboard system will be built, and an analysis of this matching scheme will be carried out. The study of this issue is related to the operation of such systems on the sections of the backbone network of the Republic of Kazakhstan. Currently, the system of interval regulation of train traffic on the basis of the SIRDP-E radio channel has been equipped with sections: Uzen-Bolashak, Zhezkazgan-Saksaulskaya, Zhetygen-Altynkol, Arkalyk-Shubarkol, Shalkar-Beineu.

Keywords: railway automation and telemechanics systems, balise, balise transmission system, electromagnetic communication, mutual inductance, SIRDP, balise antenna

Введение

Системы интервального регулирования движения поездов относятся к классу систем, предназначенных для регулирования движения поездов с целью обеспечения безопасности движения и повышения эффективности перевозочного процесса. Системы этого класса исторически называют системами сигнализации, централизации и блокировки (далее - СЦБ).

Современные системы сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ) в системах железнодорожной автоматики и телемеханики (далее – СЖАТ) играют решающую роль в железнодорожных сетях. На эти устройства и системы возлагается все большее число критически важных для безопасности операций, поэтому их надежность является одним из аспектов, требующих внимание исследовательского сообщества.

Внедрение новых микропроцессорных систем [1] должно пройти длительный процесс, прежде чем быть введенной в постоянную эксплуатацию, и одна из главных причин заключается в том, что доступные процедуры лабораторной сертификации не учитывают полностью все сложности полевой эксплуатации, что приводит к

длительным и обширным полевым испытанием. К примеру, опытное внедрение системы СИРДП-Е на участке Узень_Болашак началось в декабре 2012 года и была принята в постоянную эксплуатацию только в мае 2014 г.

В этих системах наиболее распространенными проблемами являются электромагнитные помехи и электромагнитная совместимость. Продолжительность полевых испытаний для решения этих проблем с электромагнитными помехами на железных дорогах (ЭМС) может варьироваться от трех до нескольких лет, и требует значительных финансовых затрат.

В связи с этим, в настоящее время требуется разработка стратегий и инструментов, методов для поиска путей сокращения продолжительности полевых испытаний. Поиску таких путей и анализу электромагнитной связи линии бализа-BTS посвящена данная статья.

Актуальность темы и постановка задачи. Вопросам изучения процесса электромагнитной связи системы передачи бализ посвящены труды [2]-[6], где разработаны различные модели, описывающие систему передачи телеграм сигналов с наземных устройств (бализ) на бортовые устройства, с учетом требования документов Subset-036 [6] и Subset-085 [7].

Однако, хотя процесс электромагнитной связи системы передачи бализ обсуждался и анализировался в упомянутой выше литературе, проблема согласования систем в различных технических условиях применения не была полностью решена. Влияние различных режимов установки, расстояния по вертикали и продольного отклонения между ОАУ (бортовой антенный блок) и бализой на характеристики передачи сигнала восходящей линии связи до конца не изучено. Кроме того, интенсивность сигнала нисходящей линии телеобеспечения также оказывает влияние на характеристики передачи сигнала восходящей линии, но это не обсуждалось ни в одной литературе. Чтобы полностью понять сложную взаимосвязь между различными факторами, участвующими в процессе электромагнитной связи системы передачи бализ, и создать модель электромагнитной связи, объединяющую вышеуказанные факторы, необходимо найти новые методы и подходы к исследованию данного вопроса и для достижения этой цели.

Материалы и методы. В этой части смоделирована и проанализирована схема согласования. Чтобы обеспечить эффективность передачи телеграм сигналов и уменьшить искажение сигнала, вызванное отражением и групповой задержкой, антенны BTS обычно согласованы по импедансу. Эквивалентная схема антенн для

передачи восходящего сигнала с использованием согласующей схемы L-типа показана на рисунке 1.

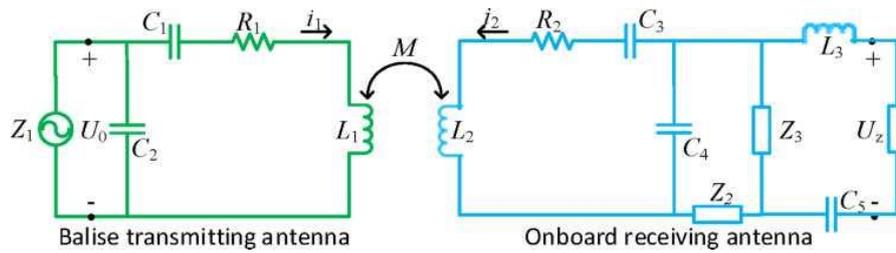


Рисунок 1 - Эквивалентная схема антенн передачи сигнала

Для передающей антенны восходящей линии связи бализ Z_1 - входное сопротивление, C_1 и C_2 - конденсаторы последовательной и параллельной настройки соответственно, R_1 представляет сумму эквивалентного сопротивления передающей антенны и сопротивления последовательных потерь, а L_1 представляет эквивалентную индуктивность передающей антенны. I_1 это ток, протекающий через передающую антенну бализ. Для бортовой приемной антенны L_2 представляет собой эквивалентную индуктивность бортовой приемной антенны. I_2 - индуцированный ток на бортовой приемной антенне. R_2 представляет собой сумму эквивалентного сопротивления учитывающую потери в бортовой приемной антенне. C_3 и C_4 - это конденсаторы последовательной и параллельной настройки соответственно. Z_2 и Z_3 - согласующие резисторы, Z_4 - сопротивление нагрузки. L_3 и C_5 используются для фильтрации сигнала дистанционного питания. M - взаимная индуктивность между передающей антенной бализ и бортовой приемной антенной.

Поскольку бортовая приемная антенна обычно использует однооборотную прямоугольную плоскую петлевую антенну, ее эквивалентной емкостью можно пренебречь, и мы можем рассчитать эквивалентную индуктивность L_2 [24] следующим образом:

$$L_2 = \frac{\mu_0}{\pi} \left\{ \begin{aligned} & l_a \cdot \ln \left[\frac{2l_a l_b}{d_c \cdot (l_a + \sqrt{l_a^2 + l_b^2})} \right] + l_b \cdot \ln \left[\frac{2l_a l_b}{d_c \cdot (l_b + \sqrt{l_a^2 + l_b^2})} \right] \\ & - 2 \left[l_a + l_b - \sqrt{l_a^2 + l_b^2} \right] + \frac{l_a + l_b}{4} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где l_a и l_b - размеры длинной и короткой сторон прямоугольной плоской контурной антенны соответственно, а d_c - диаметр эквивалентного цилиндрического проводника с тем же периметром поперечного сечения проводника антенны:

$$d_c = \frac{2(l_a + l_b)}{\pi} \quad (2)$$

где t - толщина проводника прямоугольной контурной антенны, а w - ширина проводника.

Коэффициент качества Q_r согласующей схемы может быть рассчитан следующим образом

$$Q_r = \sqrt{\frac{Z_{\text{общ}}}{R_2} - 1} \quad (3)$$

где $Z_{\text{общ}}$ - может быть рассчитан в соответствии со структурой схемы

$$Z_{\text{общ}} = c + \frac{Z_3(j\omega L_3 + Z_4 + \frac{1}{j\omega C_5})}{j\omega L_3 + Z_4 + \frac{1}{j\omega C_5} + Z_3} \quad (4)$$

Следовательно, как только коэффициент качества Q_r определен, можно рассчитать общее сопротивление R_2 последовательной цепи.

Значения реактивного сопротивления X_s согласующей цепи, подключенной последовательно к антенне, и значение реактивного сопротивления X_p согласующей цепи, подключенной параллельно к антенне, могут быть выражены как:

$$\begin{cases} X_s = Q_r R_2 \\ X_p = \frac{Z_{\text{общ}}}{Q_r} \end{cases} \quad (5)$$

В соответствии с резонансной частотой спроектированной схемы могут быть рассчитаны параметры соответствующих компонентов катушки индуктивности и конденсатора.

$$\begin{cases} L_s = \frac{X_s}{\omega} = \frac{Q_r R_2}{2\pi f_0} \\ C_p = \frac{1}{\omega X_p} = \frac{Q_r}{2\pi f_0 \cdot Z_{\text{общ}}} \end{cases} \quad (6)$$

В уравнении (6) L_s представляет индуктивность в последовательной цепи, а C_p представляет емкость параллельно выходному сопротивлению ($C_p = C_4$).

Поскольку антенна является индуктивной, ее индуктивность L_2 не равна расчетному значению указанной выше последовательной индуктивности L_s с согласованным импедансом. Следовательно, индуктивность самой антенны может быть использована для согласования импеданса.

Для оставшейся индуктивности $\Delta L = L_2 - L_s$, когда ΔL больше 0, мнимая часть согласовывается с 0 через последовательную емкость, поэтому C_3 можно рассчитать следующим образом

$$C_3 = \frac{1}{\omega^2(L_2 - L_s)} = \frac{1}{2\pi f_0(2\pi f_0 L_2 - Q_r R_2)} \quad (7)$$

Уравнение двойной сетки для всей эквивалентной схемы может быть выражено как:

$$\begin{cases} \left(R_1 + j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_1} + \frac{Z_0}{j\omega C_2 Z_0 + 1} \right) \dot{I}_1 - j\omega M \dot{I}_2 = U_0 \\ j\omega M \dot{I}_1 - \left(R_2 + j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C_3} + \frac{Z_{\text{общ}}}{j\omega C_4 Z_{\text{общ}} + 1} \right) \dot{I}_2 = 0 \end{cases} \quad (8)$$

Когда бортовая приемная антенна настроена на центральную частоту 4,234 МГц, сумма мнимых частей $j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C_3} + \frac{Z_{\text{общ}}}{j\omega C_4 Z_{\text{общ}} + 1}$ должно быть равно 0, а действительная часть $\frac{Z_{\text{общ}}}{j\omega C_4 Z_{\text{общ}} + 1}$ равно R_2 , поэтому

$$\dot{I}_2 = \frac{j\omega M \dot{I}_1}{2R_2} \quad (9)$$

Когда ΔL меньше 0, последовательная индуктивность может быть использована для увеличения индуктивности последовательной цепи, чтобы компенсировать емкостное реактивное сопротивление параллельной цепи для достижения состояния согласования. В это время резонансный ток \dot{I}_2' бортовой приемной антенны на центральной частоте может быть рассчитан таким же образом:

$$\dot{I}_2' = \dot{I}_2 = \frac{j\omega M \dot{I}_1}{2R_2} \quad (10)$$

Следовательно, напряжение порта шунтирующего конденсатора C_4 равно:

$$U_{Z_{\text{общ}}} = \frac{Z_2 - \omega C_4 Z_{\text{общ}}^2}{2R_2 (1 + \omega^2 C_4^2 Z_{\text{общ}}^2)} \cdot j\omega M \dot{I}_1 \quad (11)$$

Результаты исследования и рекомендации. Антенна бализы и антенна подвижного состава обычно имеют конструкцию прямоугольной спиральной антенны, которая относится к электрической малой петлевой антенне. Согласно исследованию, проведенному в [9], когда ОАУ системы передачи бализы находится на расстоянии более 11 см от металлической пластины, влиянием вихревого магнитного поля, генерируемого металлической пластиной, на ОАУ можно пренебречь. Следовательно, мы можем создать упрощенную модель процесса передачи по восходящей линии связи в системе передачи бализы, как показано на рисунке 2.

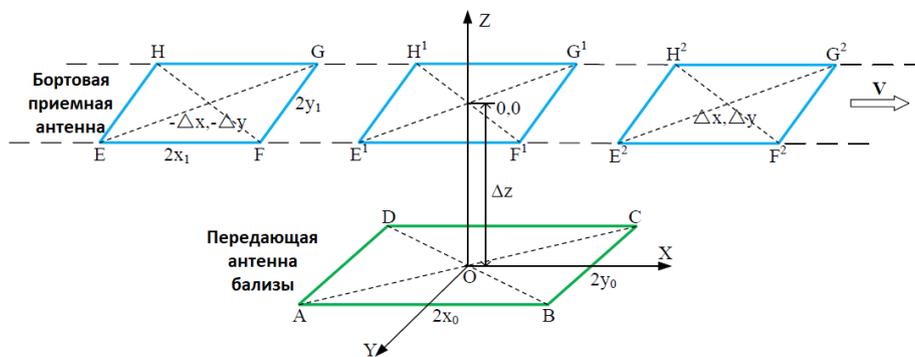


Рисунок 2 - Принципиальная схема модели взаимной индуктивности между антенной бализы и бортовой антенной

Прямоугольная ABCD - это передающая антенна бализы, а прямоугольная EFGH - бортовая приемная антенна. Устанавливается трехмерная прямоугольная система координат, принимающая за начало координат центр передающей антенны бализы. В качестве осей OX и OY используются направления, параллельные сторонам AB и DA передающей антенны бализы. Пусть направление, перпендикулярное передающей антенне бализы, является осью OZ. Вектор скорости поезда \vec{V} соответствует положительному направлению оси OX.

Пусть μ_0 - проницаемость вакуума, а x_0 и y_0 - половина боковой длины передающей антенны бализы вдоль оси OX и оси OY соответственно. Пусть x_1 и y_1 равны половине боковой длины бортовой приемной антенны вдоль оси OX и оси OY соответственно. $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ - координаты центральной точки бортовой приемной антенны. Аналитическая модель взаимной индуктивности между двумя параллельными прямоугольными антеннами при произвольных относительных положениях может быть получена с помощью метода векторных потенциалов второго порядка [10].

$$M = \frac{2\mu_0}{\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} k e^{-k\Delta z + j(a\Delta x + b\Delta y)} \frac{\sin(ax_0)}{a} \cdot \frac{\sin(by_0)}{b} \cdot \frac{\sin(ax_1)}{a} \cdot \frac{\sin(by_1)}{b} da db \quad (12)$$

Уравнение (12) является важной основой для количественной оценки характеристик электромагнитной связи системы передачи бализы. Это объясняет взаимодействие между бортовой приемной антенной и бализом. Наведенное напряжение бортовой приемной антенны также может быть рассчитано в соответствии с (1).

Комбинируя (12), (4) и (11), можно получить напряжение порта с импедансом нагрузки Z_4 после согласования и фильтрации:

$$U_{Z_4} = \frac{2A_z f_0 \mu_0 I_1 (Q_r + j)}{\pi} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} k e^{-k\Delta z + j(a\Delta x + b\Delta y)} \cdot \frac{\sin(ax_0)}{a} \cdot \frac{\sin(by_0)}{b} \cdot \frac{\sin(ax_1)}{a} \cdot \frac{\sin(by_1)}{b} da db \quad (13)$$

где $A_z = \frac{Z_3 Z_4}{(Z_2 Z_3 + Z_2 Z_4 + Z_3 Z_4)}$.

Согласно (13), можно видеть, что напряжение восходящего сигнала, принимаемого встроенной приемной антенной после хорошего согласования импеданса, связано с добротностью антенны и не имеет ничего общего с компонентами реактивного сопротивления в согласующей цепи.

На напряжение также влияют размеры передающей антенны бализы и встроенной приемной антенны, относительное пространственное положение между антеннами и

ток, протекающий через передающую антенну. Напряжение принимаемого восходящего сигнала пропорционально силе тока на передающей антенне базис.

Заключение

Построенная эквивалентная модель линии передачи телеграм сигналов в BTS в рамках поставленной цели данной работы позволяет рассчитать взаимную индуктивность между системой передачи данных бортовой системой и базисом. Полученные выражения показывают какие основные электрические и геометрические действуют на качество передачи телеграм сигналов с базиса на бортовую систему. Таким образом, учет параметров в представленных выражениях при эксплуатации систем СИРДП-Е будет способствовать обеспечения безопасного движения поездов с сохранением оптимального интервала следования.

ЛИТЕРАТУРА:

1. *Концепции модернизации и производства систем железнодорожной автоматики и телемеханики.* – Астана, 2018. – С. 16-31.
2. **Zhao, L.H.; Jiang, Y.** Modeling and simulation of balise up-link data transmission based on finite element method. *J. Theor. Appl. Inf. Technol.* 2012, 46, 867–874.
3. **Zhao, L.H.; Jiang, Y.** Modeling and optimization research for dynamic transmission process of balise tele-powering signal in high-speed railways. *Prog. Electromagn. Res.* 2013, 140, 563–588.
4. **Wang, T.; Zhao, L.H.** Modeling and optimization for balise coupling process in high speed railway. In *Proceedings of the 2017. 7th IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation, and EMC Technologies (MAPE), Xi'an, China, 24–27. October 2017; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2020; pp. 176–179.*
5. **Li, Z.J.; Cai, B.G.; Liu, J.; Lu, D.B.; Zhu, L.F.; Liu, H.** Research on performance evaluation method of down-link signal in balise based on equivalent impedance model. *J. China Railw. Soc.* 2020, 42, 85–92.
6. *FFFIS for Eurobalise. (Mandatory Specification SUBSET-036. v3.0.0, Feb. 2012). European Railway Agency (ERA).*
7. *UNISIG, "Test Specification for Eurobalise FFFIS," Mandatory Specification SUBSET-085 v3.0.0, Feb. 2012. [Online]. Available: <http://www.era.europa.eu/Document-Register/Pages/Test-specification-for-Eurobalise-FFFIS.aspx>*
8. **D. Franco, M. Aguado, C. Pinedo, I. Lopez, I. Adin and J. Mendizabal,** "A Contribution to Safe Railway Operation: Evaluating the Effect of Electromagnetic Disturbances on Balise-to-BTM Communication in Railway Control Signaling Systems," in *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 16, no. 2, pp. 104-112, June 2021, doi: 10.1109/MVT.2021.3051567.
9. **Zhu, L.F.** Antenna Modeling and Optimization Research of Rail Traffic Balise Transmission System. Ph.D. Dissertation, Department of Electronic Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing, China, 2018.
10. **Wu, D.H.; Huang, C.; Yang, F.; Sun, Q.S.** Analytical calculations of self-and mutual inductances for rectangular coils with lateral misalignment in IPT. *IET Power Electron.* 2019, 12, 4054–4062.

Рецензент: Сарсенбаев Ерлан Алиаскарович - заведующий кафедрой «Энергетика» в Satbayev University, PhD, y.sarsenbayev@satbayev.university, тел.: 8-705-315-7262