

АВТОМАТИКА, ТЕЛЕМЕХАНИКА И СВЯЗЬ

УДК 656.259.12

Д. В. КОМНАТНЫЙ, кандидат технических наук, Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭКСТРЕМАЛЬНОЙ ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ НА ФАЗОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ РЕЛЬСОВЫЕ ЦЕПИ В УСЛОВИЯХ БЕЛОРУССКОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ

Описан физический механизм воздействия геомагнитной активности на фазочувствительные рельсовые цепи. Обоснованы методы моделирования воздействия геомагнитного поля на рельсовые цепи. Выбрана геофизическая модель помехового магнитного поля магнитной бури. Предложен метод расчета наведенного магнитной бурей тока на релейном конце рельсовой цепи, основанный на теореме об эквивалентном генераторе. Проанализированы ограничения прогностических возможностей предложенного метода. Показано, что метод позволяет установить принципиальную возможность сбоя рельсовой цепи при возмущениях геомагнитного поля.

На железных дорогах Российской Федерации, расположенных в приполярных областях, наблюдается повышенное число отказов и сбоев в работе систем железнодорожной автоматики на станциях и перегонах. В частности, возникает ложная занятость рельсовых цепей, особенно фазочувствительных [1–3]. Эти отказы и сбои хорошо коррелируются с возмущениями геомагнитного поля (магнитными бурями). Такие же отказы возникали на высокоширотных железных дорогах Канады [4].

В Республике Беларусь аналогичные отказы фазочувствительных рельсовых цепей на станциях наблюдались в дни с экстремальной геомагнитной активностью (по информации проф. К. А. Бочкова). Следовательно, изучение воздействия магнитных бурь на станционные рельсовые цепи востребовано и в условиях Республики Беларусь с целью обеспечения бесперебойного перевозочного процесса и безотказного функционирования станционной автоматики.

Рассматриваемый аспект работы рельсовых цепей относится к кругу проблем электромагнитной совместимости аппаратуры железнодорожной автоматики и телемеханики. Поэтому для исследования воздействия магнитных бурь на фазочувствительные рельсовые цепи выбрана методология последовательного рассмотрения источника помех, канала распространения помех и рецептора помех.

Источником помех в данном случае является ионосфера Земли, возбуждаемая воздействием идущих от Солнца плазменных потоков. Под их действием общее магнитное поле Земли претерпевает значительные изменения. Возникает аperiодический импульс поля длительностью несколько суток (рисунок 1). На фоне этого изменения наблюдаются интенсивные короткие пульсации магнитного поля в виде последовательности импульсов, которые в первом приближении имеют треугольную форму (рисунок 2).

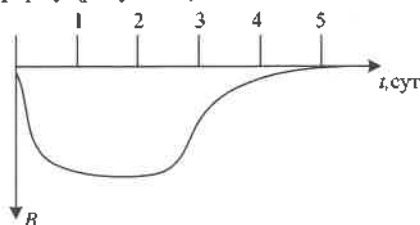


Рисунок 1 – Примерный ход магнитного поля магнитной бури

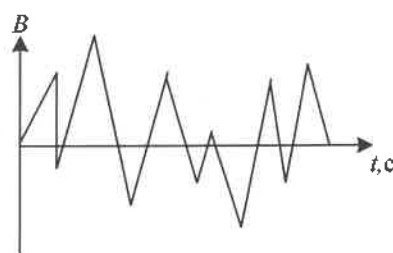


Рисунок 2 – Короткие пульсации магнитного поля

Именно эти пульсации создают в толще земли переменные теллурические токи, которые, в свою очередь, наводят электромагнитные помехи в рельсовых цепях по закону электромагнитной индукции [3, 5, 6]. По данным публикации [1], сила тока в условиях интенсивных магнитных бурь доходит до 40 А, тогда как автоматический выключатель рельсовой цепи срабатывает при 5 А [7]. Таким образом, возникающие помехи достаточны для создания сбоев в работе фазочувствительной рельсовой цепи.

Установлено [8], что интенсивность геомагнитной активности определяется ходом процессов, происходящих на Солнце. Выделяется 11-летний солнечный цикл, в котором имеется минимум, максимум активности и год спокойного Солнца. Географическое положение Республики Беларусь таково, что экстремальная геомагнитная активность проявляется только в годы солнечного максимума. При этом максимальная интенсивность явлений в эти годы заметно отличается. На плотность теллурических токов оказывают существенное влияние электрические свойства слоев почвы. Таким образом, отличительными особенностями магнитной бури являются: кратковременное протекание, регулярная, но относительно редкая, повторяемость (11 лет и более), возникновение на огромных территориях, локальность и детерминированность места влияния на рецепторы помех – приемоотправочные парки железнодорожных станций, наличие случайных вариаций проявления.

Следовательно, магнитная буря относится к кратковременным, регулярно действующим, но редким явлениям типа экстремум. Такие явления в настоящее время достаточно трудно прогнозируются (хотя успеш-

ные в определенной мере попытки прогноза опубликованы [9] и отличаются малой степенью приспособляемости к ним [10, 11].

Стратегия уменьшения ущерба от таких явлений заключается в рациональной комбинации превентивных мер и мер по ликвидации последствий. Также для управления безопасностью перевозочного процесса необходимы оценки и прогнозы возникновения опасной ситуации. Для рассматриваемого явления целесообразны заблаговременные методы прогнозирования последствий в интересах планирования оперативных мероприятий по смягчению последствий [10, 11].

Известны [10, 11] феноменологические, детерминистские и вероятностные методы оценки. С учетом свойств магнитной бури, указанных выше, целесообразным является сочетание трех представленных подходов. При вероятностном подходе выбираются наиболее вероятные значения экстремумов параметров магнитного поля сопутствующих буре явлений по принципу наихудших условий. В этом состоит отличие проблемы уменьшения ущерба от воздействия геомагнитных явлений от проблемы ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций, для которой этот подход разработан впервые. Дальнейший анализ осуществляется детерминистским методом, что подразумевает разработку математической модели воздействия геомагнитных возмущений на рельсовую цепь.

При разработке модели допустимо пренебречь сферичностью Земли [12]. Возмущения геомагнитного поля вызываются электрическими токами, протекающими в ионосфере. В источнике [12] описана модель области ионосферы, занятой токами, в виде плоского токового слоя с известным распределением плотности электрического тока. Однако плотность тока в ионосфере известна крайне приближенно. Поэтому целесообразно использовать модель источника помех в виде излучателя электромагнитной волны с преобладанием магнитной составляющей. Вектор напряженности магнитного поля волны имеет единственную составляющую H_y [12]. Характеристики и форма волны известны из наблюдений геомагнитного поля на геомагнитных обсерваториях. На основании [5, 6] падающая волна возмущенного геомагнитного поля аппроксимируется треугольными колебаниями, которые могут быть разложены в ряд Фурье. Предполагается, что в пределах приемо-отправочного парка железнодорожной станции поле волны меняется только во времени [12, 13]. Дальнейшее описание электромагнитных процессов выполняется для отдельной гармоники поля символическим методом.

Поле падающей волны возбуждает в земле вихревые теллурические токи, которые являются причиной появления отраженной электромагнитной волны [12, 14]. Для анализа воздействия на рельсовые цепи достаточно считать почву на территории приемо-отправочного парка станции бесконечным однородным полупространством с известными проводимостью σ_1 , магнитной проницаемостью μ_1 , электрической проницаемостью ϵ_1 . Тогда отраженное поле электромагнитной волны

$$H_y^{ref} = H_0 \text{Rexp}(\gamma_0 z \cos \theta) \exp(-\gamma_0 x \sin \theta), \quad (1)$$

$$\gamma_0 = j\omega \sqrt{\epsilon_0 \mu_0},$$

$$R = \frac{K_0 - K_1}{K_0 + K_1},$$

$$K_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \cos \theta,$$

$$K_1 = \frac{(\lambda^2 + \gamma_1^2)^{\frac{1}{2}}}{\sigma_1 + j\omega\epsilon_1},$$

$$\lambda = \frac{\omega}{c} \sin \theta,$$

$$\gamma_1 = [j\omega\mu_1(\sigma_1 + j\omega\epsilon_1)]^{\frac{1}{2}},$$

где H_0 – напряженность магнитного поля падающей волны, А/м; x, z – координаты, м; θ – угол падения волны, рад; ω – круговая частота, рад/с; ϵ_0 – электрическая проницаемость воздуха, μ_0 – магнитная проницаемость воздуха, c – скорость света, м/с.

Положение векторов напряженности магнитного поля показано на рисунке 3 [12].

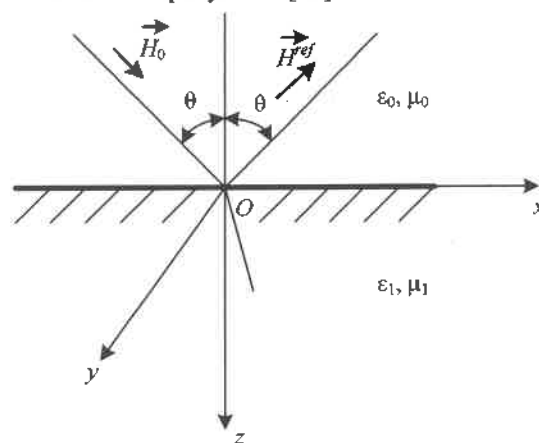


Рисунок 3 – Магнитное поле магнитной бури вблизи поверхности Земли

Отраженное поле (1) непосредственно воздействует на рецептор помехи – рельсовую линию. Комплексный магнитный поток через контур элементарного участка рельсовой линии Φ имеет вид [15]

$$\Phi = \mu_0 \mu \underline{H}(x) a dx, \quad (2)$$

где μ – магнитная проницаемость рельсовой линии; a – расстояние между подошвами рельсов, м.

По закону электромагнитной индукции в комплексной форме [15] напряженность электрического поля в рельсовой линии, В/м,

$$\underline{E} = -j\omega\Phi.$$

Тогда

$$\underline{E}(x) dx = -j\omega\mu_0\mu \underline{H}(x) a dx. \quad (3)$$

При воздействии геомагнитных возмущений на фазочувствительные рельсовые цепи наблюдается ложная занятость, т. е. отказ возникает на релейном конце рельсовой цепи. Поэтому для анализа представляет интерес только ток в релейном конце рельсовой цепи.

Для его расчета можно использовать метод, предложенный в книге [16] и основанный на теореме об эквивалентном генераторе. Расчетные соотношения для комплекса тока в релейном конце имеют вид

$$\underline{I}(l) = \frac{1}{\underline{Z}_B \underline{Z}_{\text{прив}}} \left[\underline{U}_{\text{пад}}(l) e^{\gamma l} (\underline{Z}_B + \underline{Z}_G) + \underline{U}_{\text{пад}}(0) (\underline{Z}_B - \underline{Z}_G) \right], \quad (4)$$

$$\underline{Z}_{\text{прив}} = e^{\gamma l} \frac{(\underline{Z}_B + \underline{Z}_G) + (\underline{Z}_B - \underline{Z}_G) \eta e^{-2\gamma l}}{1 - \eta},$$

$$\eta = \frac{\underline{Z}_H - \underline{Z}_B}{\underline{Z}_H + \underline{Z}_B},$$

$$\underline{U}_{\text{пад}}(0) = \frac{1}{\underline{Z}_B} \int_0^l \underline{E}(x) e^{-\gamma x} dx,$$

$$\underline{U}_{\text{пад}}(l) = \frac{-1}{\underline{Z}_B} \int_0^l \underline{E}(x) e^{-\gamma(l-x)} dx,$$

где $\underline{I}(l)$ – комплекс тока в релейном конце рельсовой цепи, А; $\underline{Z}_B$ – волновое сопротивление рельсовой линии, Ом/км; γ – комплексный километрический коэффициент затухания рельсовой линии; l – длина рельсовой линии, м; $\underline{Z}_G$ – комплексное сопротивление на генераторном конце рельсовой цепи, Ом; $\underline{Z}_H$ – сопротивление нагрузки рельсовой цепи, Ом.

Таким образом, имеется принципиальная возможность расчета электромагнитных процессов в фазочувствительных рельсовых цепях во время магнитной бури.

В публикации [4] также предложена математическая модель воздействия геомагнитных возмущений на рельсовые цепи. При сравнении ее с моделью, предложенной в данной статье, можно отметить следующее. Во-первых, в [4] недостаточно для проведения расчетов описана модель помехового поля. Во-вторых, расчет электромагнитных процессов в рельсовой линии ведется методом замены линии цепочечной схемой замещения в виде каскадного соединения П-образных четырехполюсников. Поэтому расчеты оказываются громоздкими и содержат избыточную информацию, так как представляет интерес только режим на релейном конце. В-третьих, не учтено, что геомагнитные вариации имеют несинусоидальную форму. Математическая модель геомагнитного воздействия в данной статье использует апробированную в геофизике модель магнитотеллурических процессов [5, 6, 12, 13] и метод расчета процессов в релейном конце рельсовой цепи на основании теоремы об эквивалентном генераторе [16]. Последнее, как видно из (4), существенно сокращает проведение расчетов. Таким образом, модель, предложенная в настоящей статье, имеет преимущества перед предложенной в [4].

Поскольку исходные данные для расчета (амплитуда электромагнитной волны, угол падения) выбраны по принципу наихудших условий, то расчет по предложенной модели может выявить только принципиальную возможность сбоя рельсовой цепи при магнитной буре. Прогноз сбоев в конкретной геомагнитной обстановке затруднен, так как недоступен долгосрочный количественный прогноз активности Солнца,

процессов в ионосфере и пульсаций магнитного поля на протяжении значительных промежутков времени. Результативность прогноза снижается, так как принята простейшая модель земли в виде однородного полупространства. Если принять, что земля состоит из нескольких слоев, то существенно усложняются расчетные соотношения и встает проблема определения электрических свойств этих слоев [12]. Пульсации магнитного поля аппроксимированы треугольными колебаниями, что вызывает отклонения результатов моделирования от реальных электромагнитных процессов.

В связи с этим даже для околополярных железных дорог Российской Федерации в [3] предлагается ограничиться использованием резервных способов регулирования и оперативного управления перевозочным процессом [17], к которым стоит прибегать в случае нарушений работы фазочувствительных рельсовых цепей в известные по прогнозу дни с повышенной солнечной активностью. Тем более это справедливо для Белорусской железной дороги, где такие нарушения возможны только в случае чрезвычайно больших геомагнитных возмущений.

Несмотря на указанные обстоятельства, исследование воздействия геомагнитных возмущений на аппаратуру железнодорожной автоматики и телемеханики, в том числе и на фазочувствительные рельсовые цепи, имеет несомненный теоретический интерес. Результаты исследований могут найти применение, в частности, для выявления причин нарушения перевозочного процесса. Поэтому оказывается востребованной и разработка математических моделей геомагнитного воздействия в теории рельсовых цепей.

Список литературы

- 1 Костромин, А. М. Влияние геоиндуцированных токов на дроссель-трансформаторы рельсовых цепей железнодорожной автоматики / А. М. Костромин // Известия Петербургского университета путей сообщения – 2022. – Т. 18, вып. 2. – С. 222–228.
- 2 Влияние космической погоды на надежность функционирования транспортных систем на высоких широтах / В. А. Пилпенко, А. А. Черников, А. А. Соловьев [и др.] // Russian Journal of Earth Sciences. – 2023. – Vol. 23, № 3. – С. 22–34.
- 3 Исследование влияния геомагнитной активности на функционирование систем железнодорожной автоматики в Арктической зоне России / Н. В. Ягова, И. Н. Розенберг, А. Д. Гвишиани [и др.] // Арктика: экология и экономика. – 2023. – Т. 13, № 3. – С. 341–352.
- 4 Boteler, D. H. Modeling Geomagnetic Interference on Railway Signaling Track Circuits / D. H. Boteler // Space Weather. – 2021. – Vol. 11, № 1. – P. 1–18.
- 5 Бердичевский, М. Н. Магнитотеллурическое зондирование горизонтальных однородных сред / М. Н. Бердичевский, В. И. Дмитриев. – М.: Недра, 1992. – 250 с.
- 6 Бердичевский, М. Н. Электрические разведки методом магнитотеллурического профилирования / М. Н. Бердичевский. – М.: Недра, 1968. – 254 с.
- 7 Кириенко, А. Г. Электрические рельсовые цепи / А. Г. Кириенко, Н. Л. Пельменева. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2006. – 94 с.
- 8 Чижевский, А. Л. Земля в объятиях Солнца / А. Л. Чижевский. – М.: Эксмо, 2020. – 928 с.
- 9 Физические основы прогнозирования ионосферных возмущений / М. И. Пудовкин, В. П. Козенов, Л. Л. Лазутин [и др.]; под ред. С. И. Исаева. – Л.: Наука, 1977. – 312 с.

10 Акимов, В. А. Основы анализа и управления рисками в природной и техногенной сферах / В. А. Акимов, В. В. Лесных, Н. Н. Разиев. – М. : Деловой экспресс, 2004. – 352 с.

11 Акимов, В. А. Риски в природе, техносфере, обществе и экономике / В. А. Акимов, В. В. Лесных, Н. Н. Разиев. – М. : Деловой экспресс, 2004. – 352 с.

12 Уэйт, Дж. Р. Геоэлектромагнетизм / Дж. Р. Уэйт. – М. : Недра, 1987. – 235 с.

13 Ваньян, Л. Л. Магнитотеллурическое зондирование слоистых сред / Л. Л. Ваньян, Т. И. Бутковская. – М. : Недра, 1980. – 228 с.

14 Сивухин, Д. В. Общий курс физики: электричество / Д. В. Сивухин. – М. : Наука, 1983. – 687 с.

15 Теоретические основы электротехники : в 3 т. / К. С. Демирчан, Л. Р. Нейман, Н. В. Коровкин [и др.]. – СПб. : Питер, 2006. – Т. 1. – 463 с.

16 Каллер, М. Я. Теория линейных электрических цепей железнодорожной автоматики, телемеханики и связи / М. Я. Каллер, Ю. В. Соболев, А. Г. Богданов. – М. : Транспорт, 1987. – 335 с.

17 Пищик, Ф. П. Безопасность движения на железнодорожном транспорте / Ф. П. Пищик. – Гомель : БелГУТ, 2009. – 267 с.

Получено 11.03.2025

D. V. Komnatny. Investigation of extremal geomagnetic activity influence on phase-sensitive track circuits in conditions of Byelorussian railway.

The influence of geomagnetic activity on phase-sensitive track circuits is considered. The physical mechanism of this influence is described. The methods of geomagnetic field influence on track circuits modeling are grounded. The geophysics model of disturbance magnetic field is chosen. The method of induced by geomagnetic storm current in track circuit relay end calculation, based on Thevenin equivalent theorem, is proposed. The prognostic possibilities limits of proposed method are analyzed. It is shown, that method allows to ascertain the malfunction possibility of principle for track circuit during geomagnetic field disturbances.