

ления движением поездов. Для достижения этого необходимы методы предиктивного проектирования аппаратуры систем управления движением поездов, направленные на обеспечение требуемого уровня помехоустойчивости этой аппаратуры уже на этапе проектирования. Поскольку возникающие при этом электродинамические задачи отличаются высокой сложностью и решаются с упрощающими предположениями, то необходимым этапом внедрения новых систем СЦБ и АСУ является их сертификация и доказательство безопасности с проведением натуральных испытаний на воздействие электромагнитных помех. Так как имеется большое число помех, а испытательное оборудование является, в достаточном числе случаев, уникальным, то требуется комплексирование испытаний к разным видам помех. Также испытательные процедуры должны быть адаптированы к особенностям железнодорожных систем, а именно к высоким требованиям по полноте безопасности SIL 4.

Накопленный опыт работ в области электромагнитной совместимости систем управления движением поездов позволяет заключить, что все указанные задачи могут быть решены на должном уровне, достаточном для обеспечения безопасности движения.

УДК 656.259.12

## УЧЕТ ФЕРРОМАГНИТНЫХ СВОЙСТВ СТАЛИ ПРИ АНАЛИЗЕ ПРОЦЕССОВ В РЕЛЬСОВЫХ ЦЕПЯХ

*Д. В. КОМНАТНЫЙ*

*Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого, Республика Беларусь*

В докладе исследуется влияние ферромагнитных свойств рельсовой стали на процессы передачи синусоидального сигнала в рельсовой цепи. Для этого записывается система уравнений для цепи с распределенными параметрами и нелинейной погонной индуктивностью. При записи предполагается, что погонное сопротивление рельсовой цепи постоянное, погонная проводимость утечки также постоянная, погонная емкость рельсовой линии не учитывается. Вебер-амперная характеристика стали аппроксимируется полиномом третьей степени.

$$\frac{\partial u}{\partial x} = -\frac{\partial \Phi}{\partial t} - Ri, \quad \frac{\partial i}{\partial x} = -Gu, \quad u = Ri, \quad i = Gu, \quad \Phi(i) = ai + bi^3, \quad (1)$$

где  $u$  – напряжение в цепи, В;  $i$  – ток в цепи, А;  $\Phi$  – магнитный поток в цепи, Вб;  $x$  – координата, км;  $t$  – время, с;  $R$  – погонное сопротивление, Ом/км;  $G$  – проводимость утечки, См/км;  $a, b$  – коэффициенты аппроксимации вебер-амперной характеристики стали.

Система (1) преобразуется к нелинейному уравнению в частных производных для тока в рельсовой цепи

$$\frac{\partial^2 i}{\partial x^2} - RGi = (Ga + 3bGi^2) \frac{\partial i}{\partial t}. \quad (2)$$

В уравнении (2) осуществляется замена переменных  $\frac{\partial}{\partial t} \rightarrow v \frac{d}{d\eta}$ ,  $\frac{\partial}{\partial x} \rightarrow \frac{d}{d\eta}$ . При этом  $v$  – скорость распространения сигнала в рельсовой цепи. Она определяется по известным формулам теории цепей с распределенными параметрами, в предположении, что индуктивность рельсовой цепи постоянная и не зависит от тока в цепи.

После замены уравнение (2) приводится к виду, удобному для применения метода Ван-дер-Поля

$$\frac{1}{G} \frac{\partial^2 i}{\partial \eta^2} - Ri = (a + 3bi^3) v \frac{\partial i}{\partial \eta}. \quad (3)$$

Для решения по методу Ван-дер-Поля вводится новое время  $\tau = \sqrt{RG}\eta$ .

Тогда уравнение (3) преобразуется к виду

$$\frac{d^2 i}{d\tau^2} - i = (a + 3bi^3) v \sqrt{\frac{G}{R}} \frac{di}{d\tau}. \quad (4)$$

Предполагается, что в первом приближении в рельсовой цепи распространяются синусоидальные волны. Поэтому решение уравнения (4) ищем в виде

$$i(\tau) = I_m \cos \Theta. \quad (5)$$

Первое приближение метода Ван-дер-Поля имеет вид

$$\dot{\Theta} = 1 - \frac{v\sqrt{G}}{I_m R} \varphi_2(I_m),$$

$$\varphi_2 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} (a + b(I_m \cos \Theta)^2) (-I_m \sin \Theta) \cos \Theta d\Theta. \quad (6)$$

Легко убедиться, что соотношение (6) тождественно равно нулю. Следовательно, первое приближение метода Ван-дер-Поля не дает ответа на вопрос о характере колебаний в рельсовой цепи. Это означает, что в первом приближении нелинейные эффекты в рельсовой цепи не проявляются. Такое заключение подтверждается практикой проектирования и эксплуатации рельсовых цепей. Как известно, существующие методики расчета и проектирования рельсовых цепей основаны на представлении рельсовой цепи системой линейных четырехполосников или на графовом описании процессов в рельсовой цепи без учета ее нелинейности. Расчеты ведутся символическим методом, который применим без ограничений только к линейным цепям. Полученные результаты оказываются недостаточными для практики.

Далее рассматривается второе приближение метода Ван-дер-Поля, которое имеет вид

$$\dot{\Theta} = 1 - \frac{v\sqrt{G}}{I_m R} (a + b(I_m \cos \Theta)^2) (-I_m \sin \Theta) \cos \Theta. \quad (7)$$

В стационарном случае производная фазы равна нулю. Тогда из (7) получается уравнение для поправки к фазе, зависящей от амплитуды сигнала. Такая зависимость является нелинейным эффектом.

$$1 + \frac{v\sqrt{G}}{I_m R} (a I_m \sin \Theta \cos \Theta + b I_m^2 \cos^3 \Theta \sin \Theta) = 0. \quad (8)$$

Следовательно, в рельсовых цепях ферромагнитные свойства рельсовой стали вызывают нелинейный эффект второго порядка малости – паразитную фазовую модуляцию. Это один из возможных нелинейных эффектов, который может наблюдаться во многих нелинейных электрических устройствах. Учет такого эффекта необходим при разработке приемников сигналов рельсовых цепей, реализующих сложные процедуры обработки сигнала на основании современной теории связи.

Полученные в докладе результаты имеют полукачественный характер. В современной теории колебаний имеются методы, позволяющие описать процесс паразитной модуляции количественно и получить выражения для колебаний в рельсовой цепи.

Следует также указать, что в докладе уравнения (1) записаны для ненасыщенной стали рельс. При намагничении стали до насыщения (например, по причине воздействия тягового тока электрифицированной магистрали) аппроксимация вебер-амперной характеристики стали полиномом уже не описывает явление в стали с требуемой точностью. Требуется аппроксимация с насыщенным участком, например гиперболическими функциями или логистической кривой. Метод расчета процессов рельсовой цепи остается тем же.

Таким образом, в докладе метод расчета процессов в нелинейных цепях с распределенными параметрами апробирован для анализа рельсовых цепей с учетом ферромагнитных свойств рельсовой стали. Полученные результаты позволяют заключить, что для ненасыщенной стали нелинейные эффекты имеют второй порядок малости. Поэтому разработанные к настоящему времени методы расчета и проектирования рельсовых цепей сохраняют свою силу. Эффекты второго порядка малости не оказывают большого влияния на достоверность получаемых этими методами результатов. С другой стороны, выявление этих эффектов имеет несомненный теоретический и практический интерес. Также для развития теории рельсовых цепей имеет большое значение апробация методов анализа, основанных на достижениях современной теории колебаний и нелинейных дифференциальных уравнений с частными производными.