

УДК 65807

В.А. Целищев¹

¹Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ РЕЛЬСОВЫХ ЦЕПЕЙ

Аннотация. Рассматриваются основные функции и область применения рельсовых цепей, основные пути совершенствования алгоритмов функционирования, математические модели нормального, шунтового, контрольного режимов, режимов короткого замыкания и АЛС при четырехполюсной схеме замещения рельсовых цепей.

Ключевые слова: модель, математическая модель, рельсовая цепь, четырехполюсник.

V.A. Tselishchev¹

¹Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russian Federation

MATHEMATICAL MODELING OF THE MODES OF OPERATION OF RAIL CIRCUITS

Abstract. The main functions and applications of rail circuits, the main ways to improve the algorithms of operation, mathematical models of normal, shunt, control modes, short circuit modes and ALS with a four-pole rail circuit replacement scheme are considered.

Key words: model, mathematical model, rail chain, four-pole.

Введение

Железные дороги играют значительную роль в выполнении перевозок пассажиров и грузов, обеспечивающих функционирование промышленности страны. Основой всех систем железнодорожной автоматики и телемеханики являются рельсовые цепи, выполняющие функции датчиков информации о местонахождении подвижного состава, а также используемые как телемеханические каналы для передачи информации между путевыми устройствами и между путевыми и поездными устройствами [2, 3, 4, 5,].

Основной целью моделирования технических объектов является определение свойств и характеристик до их изготовления и при необходимости уточнить структуру и параметры. Это позволяет получить проект работоспособного технического объекта, который не придется существенно дорабатывать тогда, когда он будет изготовлен промышленностью. Таким образом, моделирование удешевляет процесс проектирования, сокращает время на реализацию. Модель позволяет проверить поведение технического объекта в условиях и режимах, для которых он не предназначен. Очевидно, что такие эксперименты на реальном объекте могут быть не только дороги, но и небезопасны. В то время как моделирование позволяет получить нужную информацию о поведении объекта без лишних материальных и финансовых затрат, а также без негативных последствий [12, 13, 14,15].

Предложенные в статье математические модели рельсовой цепи делают попытку осуществить реализацию моделирования в таком программном продукте как MatCad.

Постановка и решение задачи.

У рельсовых цепей различают три основных режима работы: нормальный, шунтовой, контрольный.

На условия работы рельсовой цепи в каждом из режимов влияют: удельное сопротивление изоляции ($r_{u\min} \dots r_{u\max}$);

удельное сопротивление рельсов ($Z_{min} \dots Z_{max}$);
напряжение и мощность источника питания ($U_{Пmin} \dots U_{Пmax}$);
тип и параметры примененного путевого приемника;
вид тяги (автономная или электрическая).

Кроме основных режимов работы у рельсовой цепи есть еще два дополнительных: короткого замыкания и автоматической локомотивной сигнализации [6, 7, 8, 9, 10].

При математическом моделировании рельсовой цепи в указанных режимах работы предлагается применять общую схему замещения (рис. 1), которая представляет собой последовательное соединение трех четырехполюсников: начала рельсовой цепи (H), собственно рельсовой линии ($РЛ$) и конца рельсовой цепи (K).

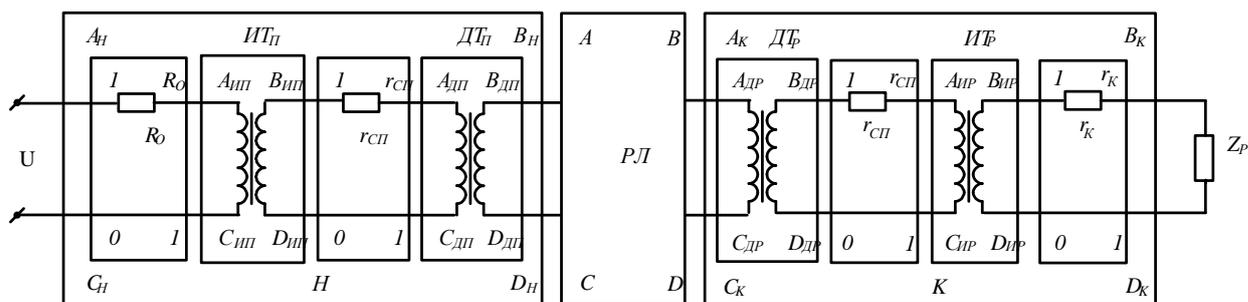


Рис. 1

В состав четырехполюсника начала рельсовой цепи включают всю промежуточную и защитную аппаратуру питающего конца: дроссель-трансформатор, согласующий трансформатор, защитные резисторы, сопротивление соединительных проводов. В состав четырехполюсника конца рельсовой цепи входит вся промежуточная и защитная аппаратура релейного конца: дроссель-трансформатор, согласующие трансформаторы, защитные фильтры и резисторы, сопротивление соединительных проводов и кабеля, путевого приемника. В составе четырехполюсника рельсовой линии учтены рельсовая петля и сопротивление изоляции [1, 11].

При проведении моделирования режимов работы рельсовой цепи приняты допущения: четырехполюсники являются идеальными, линейными и пассивными;

параметры четырехполюсников начала и конца рельсовой цепи являются постоянными и не зависящими от режимов работы рельсовой цепи;

параметры четырехполюсника рельсовой линии являются переменными, зависящими от режима работы рельсовой цепи.

Моделирование нормального режима работы рельсовой цепи.

Задачами моделирования нормального режима работы рельсовой цепи являются:

выбор напряжения, тока и мощности источника питания;

проверка работоспособности РЦ по критерию перегрузки путевого реле при выбранном напряжении источника питания.

Схема замещения рельсовой цепи в нормальном режиме работы имеет вид (рис. 2). Зная величины электрических параметров путевого приемника, можно, последовательно вычисляя величины напряжений на выходах и входах четырехполюсников конца рельсовой цепи, рельсовой линии, начала рельсовой цепи определить необходимую величину напряжения на выходе питающего трансформатора.

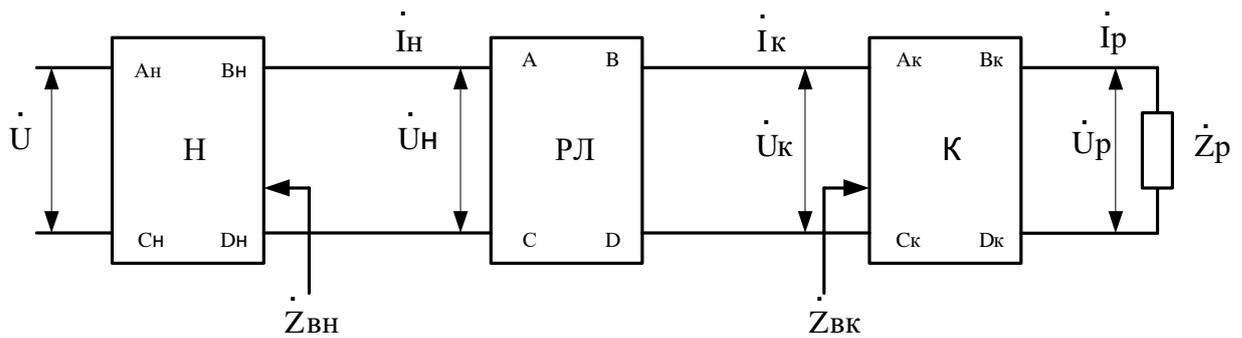


Рис. 2

Коэффициенты четырёхполюсника начала РЦ:

$$\begin{vmatrix} A_H & B_H \\ C_H & D_H \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & R_o \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} A_{ИТп} & B_{ИТп} \\ C_{ИТп} & D_{ИТп} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} 1 & r_{сп} \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} A_{ДТп} & B_{ДТп} \\ C_{ДТп} & D_{ДТп} \end{vmatrix}$$

Коэффициенты четырёхполюсника конца РЦ:

$$\begin{vmatrix} A_K & B_K \\ C_K & D_K \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A_{ДТр} & B_{ДТр} \\ C_{ДТр} & D_{ДТр} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} 1 & r_{сп} \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} A_{ИТр} & B_{ИТр} \\ C_{ИТр} & D_{ИТр} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} 1 & r_k \\ 0 & 1 \end{vmatrix}$$

Коэффициенты четырёхполюсника рельсовой линии:

$$A = D = ch\gamma l; \quad B = \dot{Z}_B sh\gamma l; \quad C = \frac{sh\gamma l}{\dot{Z}_B}$$

Вторичные параметры рельсовой линии, входящие в рассмотренные выражения:

$$\gamma = \sqrt{\frac{\dot{Z}}{r_{из}}}; \quad \dot{Z}_B = \sqrt{\dot{Z} r_{из}},$$

где γ – коэффициент распространения волны, \dot{Z}_B – волновое сопротивление рельсов, \dot{Z} – комплекс сопротивления рельсов, $r_{из}$ – эквивалентное сопротивление изоляции рельсовой линии.

При наличии заземления опор контактной сети эквивалентное сопротивление изоляции рельсовой линии равно:

$$r_{из} = 0,5 r_i + \frac{0,5 r_i r_o}{0,5 r_i + r_o},$$

где r_o – удельное сопротивление цепей заземления опор контактной сети, r_i – сопротивление изоляции рельсовой линии.

Минимальные напряжение и ток источника, необходимые для питания рельсовой цепи, определяется последовательным вычислением напряжения и тока каждого четырёхполюсника схемы замещения:

напряжение и ток в конце рельсовой линии:

$$\dot{U}_K = A_K \dot{U}_P + B_K \dot{I}_P, \quad \dot{I}_K = C_K \dot{U}_P + D_K \dot{I}_P;$$

напряжение и ток в начале рельсовой линии:

$$\dot{U}_H = A \dot{U}_K + B \dot{I}_K, \quad \dot{I}_H = C \dot{U}_K + D \dot{I}_K;$$

минимальные напряжение и ток источника питания:

$$\dot{U}_{min} = A_H \dot{U}_H + B_H \dot{I}_H, \quad \dot{I}_{min} = C_H \dot{U}_H + D_H \dot{I}_H.$$

Напряжение, которое можно установить на зажимах источника питания, равно по величине ближайшему большему напряжению \dot{U}_{66} на выходе источника питания с учетом градации его регуляровки.

Коэффициент градации регуляровки напряжения равен:

$$k_{тр} = \frac{\dot{U}_{66}}{|\dot{U}_{min}|}$$

В результате фактические напряжение, ток и мощность источника питания в нормальном режиме работы равны:

$$\dot{U}_\phi = k_{ИС} k_{тр} \dot{U}_{min}, \quad \dot{I}_\phi = k_{ИС} k_{тр} \dot{I}_{min}, \quad \dot{S}_\phi = \dot{U}_\phi \dot{I}_\phi.$$

Если величина фактической потребляемой мощности рельсовой цепи не превышает максимальную установленную для использованного источника питания, то нормальный режим работы обеспечен.

Коэффициент перегрузки путевого приемника равен:

$$k_{\text{пер}} = k_{\text{зсп}} k_{\text{ис}} k_{\text{тр}} \frac{|\dot{Z}_{\text{п max}}|}{|\dot{Z}_{\text{п min}}|},$$

где $k_{\text{зсп}}$ – коэффициент запаса по срабатыванию, $k_{\text{ис}}$ – допустимый коэффициент колебания напряжения источника питания, $k_{\text{тр}}$ – коэффициент градации напряжения, $|\dot{Z}_{\text{п max}}|$, $|\dot{Z}_{\text{п min}}|$ – соответственно модуль комплексного максимального и минимального сопротивления передачи схемы замещения рельсовой цепи при максимальном и минимальном сопротивлении изоляции.

Максимальное сопротивление передачи схемы замещения рельсовой цепи при минимальном сопротивлении изоляции:

$$\dot{Z}_{\text{п max}} = k_{\text{тн}} k_{\text{тк}} [A \dot{Z}_{\text{вк}} + B + (C \dot{Z}_{\text{вк}} + D) \dot{Z}_{\text{вн}}],$$

здесь $k_{\text{тн}} = A_{\text{н}}$ – обратный коэффициент снижения тока в четырехполюснике начала, $k_{\text{тк}}$ – прямой коэффициент снижения тока в четырехполюснике конца, $\dot{Z}_{\text{вк}}$ – прямое входное сопротивление четырехполюсника конца, $\dot{Z}_{\text{вн}}$ – обратное входное сопротивление четырехполюсника начала.

Прямой коэффициент снижения тока в четырехполюснике конца равен:

$$k_{\text{тк}} = C_K \dot{Z}_p + D_K,$$

где \dot{Z}_p – сопротивление обмотки путевого реле.

Прямое входное сопротивление четырехполюсника конца:

$$\dot{Z}_{\text{вк}} = \frac{A_K \dot{Z}_p + B_K}{C_K \dot{Z}_p + D_K}.$$

Обратное входное сопротивление четырехполюсника начала:

$$\dot{Z}_{\text{вн}} = \frac{B_H}{A_H}.$$

Минимальное сопротивление передачи схемы замещения рельсовой цепи при максимальном сопротивлении изоляции:

$$\dot{Z}_{\text{п min}} = k_{\text{тн}} k_{\text{тк}} (\dot{Z}_{\text{вк}} + \dot{Z}_l + \dot{Z}_{\text{вн}}),$$

здесь \dot{Z} – удельное сопротивление рельсов, l – длина рельсовой линии.

Если расчетная величина коэффициента перегрузки путевого реле не превышает установленную для него максимально допустимую величину, то РЦ работоспособна для нормального режима работы.

Фрагмент модели рельсовой цепи в нормальном режиме работы, реализованной в программе MathCad.

Коэффициенты четырехполюсника питающего конца:

$$Mn := \begin{pmatrix} 1 & R_0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} A_{\text{итп}} & B_{\text{итп}} \\ C_{\text{итп}} & D_{\text{итп}} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & r_{\text{сп}} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} A_{\text{дтп}} & B_{\text{дтп}} \\ C_{\text{дтп}} & D_{\text{дтп}} \end{pmatrix}.$$

Коэффициенты четырехполюсника релейного конца:

$$Mk := \begin{pmatrix} A_{\text{дтр}} & B_{\text{дтр}} \\ C_{\text{дтр}} & D_{\text{дтр}} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & r_{\text{сп}} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} A_{\text{итр}} & B_{\text{итр}} \\ C_{\text{итр}} & D_{\text{итр}} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & Rk \\ 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Эквивалентное сопротивление изоляции:

$$r_{\text{иэ}} := 0.5 \cdot r_{\text{и}} + \frac{0.5 \cdot r_{\text{и}} \cdot r_0}{0.5 \cdot r_{\text{и}} + r_0}.$$

Коэффициент распространения волны, волновое сопротивление:

$$Z_v := \sqrt{z \cdot r_{из}}, \quad \gamma := \sqrt{\frac{z}{r_{из}}}$$

Коэффициенты рельсового четырехполюсника:

$$M_{рл} := \begin{pmatrix} \cosh(\gamma \cdot l) & Z_v \cdot \sinh(\gamma \cdot l) \\ \frac{\sinh(\gamma \cdot l)}{Z_v} & \cosh(\gamma \cdot l) \end{pmatrix}$$

Напряжение и ток в конце рельсовой линии:

$$U_k := Mk_{0,0} \cdot U_p + Mk_{0,1} \cdot I_p;$$

$$I_k := Mk_{1,0} \cdot U_p + Mk_{1,1} \cdot I_p.$$

Напряжение и ток в начале рельсовой линии:

$$U_n := Mрл_{0,0} \cdot U_k + Mрл_{0,1} \cdot I_k;$$

$$I_n := Mрл_{1,0} \cdot U_k + Mрл_{1,1} \cdot I_k.$$

Минимальные напряжение и ток источника питания:

$$U_{min} := Mn_{0,0} \cdot U_n + Mn_{0,1} \cdot I_n;$$

$$I_{min} := Mn_{1,0} \cdot U_n + Mn_{1,1} \cdot I_n.$$

Коэффициент градации напряжения источника питания:

$$k_{тр} := \frac{Ceil(|U_{min}|, 5)}{|U_{min}|}$$

Фактические напряжение и ток источника питания:

$$U_{\phi} := k_{тр} \cdot k_{ис} \cdot U_{min};$$

$$I_{\phi} := k_{тр} \cdot k_{ис} \cdot I_{min}.$$

Мощность, потребляемая РЛ в нормальном режиме $S_{рц} := U_{\phi} \cdot I_{\phi}$.

Коэффициент перегрузки путевого реле:

$$k_{пер} := k_{зсп} \cdot k_{ис} \cdot k_{тр} \cdot \frac{|Z_{пmax}|}{|Z_{пmin}|}$$

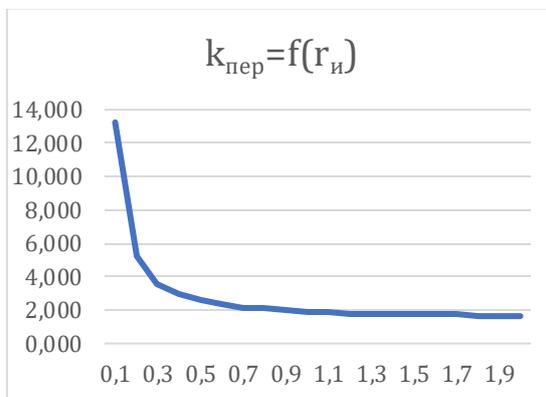


Рис. 3

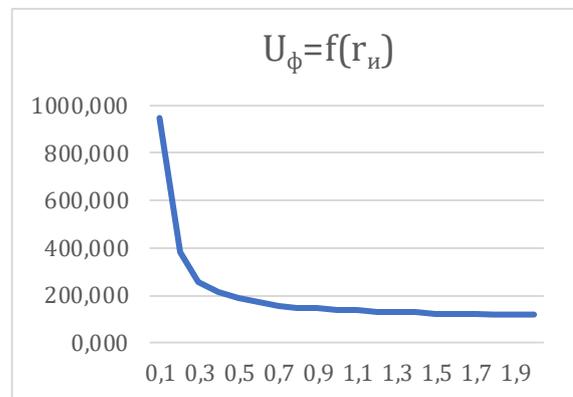


Рис. 4

Сопротивление изоляции рельсовой линии является определяющим фактором, влияющим на все режимы работы рельсовой цепи, а также на процесс ее регулировки. Анализ поведения графиков $U_{\phi} = f(r_{из})$ и $k_{пер} = f(r_{из})$ (рис. 3 и рис. 4) свидетельствует:

при низком сопротивлении изоляции (до 1.0 Ом/км) потребные напряжение и мощность источника питания рельсовой цепи достаточно высоки. Диапазон регулировки очень широк, что приводит к необходимости частой регулировки напряжения питания при изменении сопротивления изоляции;

при сопротивлении изоляции более 1.0 Ом/км потребные напряжение и мощность источника напряжения достаточно низкие и стабильные по величине. Что очень положительно сказывается на процессе регулировки рельсовой цепи, а также на выборе самого источника и напряжения;

при сопротивлении изоляции более 1.0 Ом/км происходит стабилизация изменения коэффициента перегрузки путевого реле, что положительно сказывается на режиме работы рельсовой цепи.

Моделирование шунтового режима работы рельсовой цепи.

В шунтовом режиме работы рельсовой цепи определяющим является максимальное значение напряжения источника питания рельсовой цепи. Чем выше напряжение источника питания, тем ниже шунтовая чувствительность рельсовой цепи. Это объясняется тем, что при определенной величине сопротивления изоляции при нахождении колесной пары на рельсовой линии напряжения источника питания окажется достаточным по величине, чтобы путевое реле оставалось в возбужденном состоянии (якорь притянут к сердечнику реле). Поэтому существует так называемое, допустимое (максимальное) напряжение источника напряжения питания, при котором соблюдается шунтовый режим работы рельсовой цепи.

Схема замещения рельсовой цепи в шунтовом режиме работы при наложении шунта на релейном конце рельсовой линии имеет вид (рис. 5).

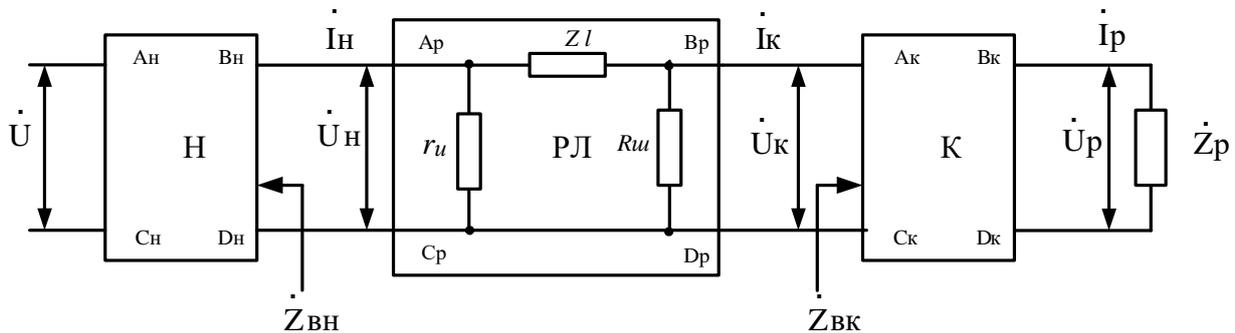


Рис. 5

Схема замещения рельсовой цепи в шунтовом режиме работы при наложении шунта на питающем конце рельсовой линии имеет вид (рис. 6).

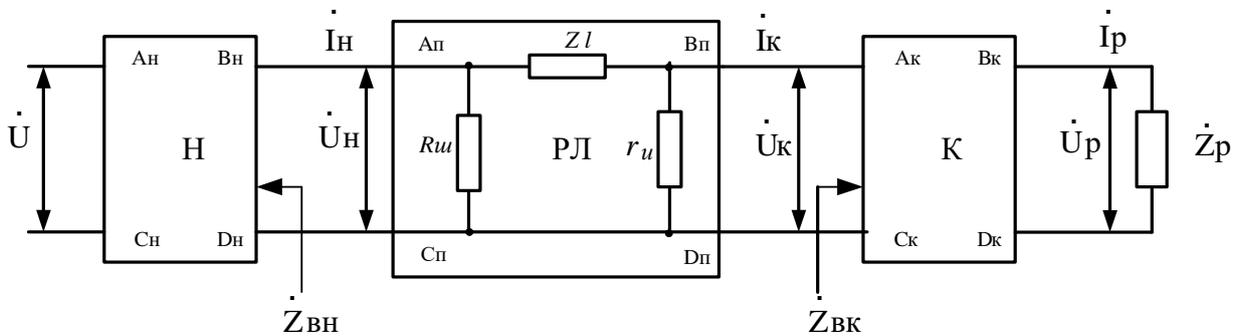


Рис. 6

Коэффициенты шунтовой чувствительности при наложении нормативного шунта на релейном и питающем конце:

$$k_{ш\ p} = \left| \frac{\dot{U}_{Д\ p}}{\dot{U}_{\phi}} \right|, \quad k_{ш\ п} = \left| \frac{\dot{U}_{Д\ п}}{\dot{U}_{\phi}} \right|.$$

Напряжение \dot{U}_{ϕ} берем из результатов расчета нормального режима.

Допустимые величины напряжений на релейном и питающем конце рельсовой линии равны:

$$\dot{U}_{Д\ p} = k'_{ВН} \dot{I}_p \dot{Z}_{п\ p}, \quad \dot{U}_{Д\ п} = k'_{ВН} \dot{I}_p \dot{Z}_{п\ п},$$

где $k'_{ВН} = k_{ВН} / k_{ис}$ – приведенный коэффициент возврата реле, $\dot{Z}_{п\ p}$, $\dot{Z}_{п\ п}$ – комплексные сопротивления передачи схемы замещения при наложении нормативного шунта соответственно на релейном и питающем конце рельсовой линии.

Сопротивления передачи РЦ при наложении шунта на релейном и питающем конце равны:

$$\begin{aligned}\dot{Z}_{\text{пр}} &= k_{\text{тн}} k_{\text{тк}} [A_{\text{р}} \dot{Z}_{\text{вк}} + B_{\text{р}} + (C_{\text{р}} \dot{Z}_{\text{вк}} + D_{\text{р}}) \dot{Z}_{\text{вн}}], \\ \dot{Z}_{\text{пп}} &= k_{\text{тн}} k_{\text{тк}} [A_{\text{п}} \dot{Z}_{\text{вк}} + B_{\text{п}} + (C_{\text{п}} \dot{Z}_{\text{вк}} + D_{\text{п}}) \dot{Z}_{\text{вн}}].\end{aligned}$$

Величины $k_{\text{тн}}$, $k_{\text{тк}}$, $\dot{Z}_{\text{вн}}$, $\dot{Z}_{\text{вк}}$ берем из расчетов нормального режима. Коэффициенты четырехполюсника рельсовой линии:

при наложении шунта на релейном конце:

$$A_{\text{р}} = 1 + \frac{\dot{Z}l}{R_{\text{ш}}}, \quad B_{\text{р}} = \dot{Z}l, \quad C_{\text{р}} = \frac{1}{R_{\text{ш}}}, \quad D_{\text{р}} = 1,$$

при наложении шунта на питающем конце:

$$A_{\text{п}} = 1, \quad B_{\text{п}} = \dot{Z}l, \quad C_{\text{п}} = \frac{1}{R_{\text{ш}}}, \quad D_{\text{п}} = 1 + \frac{\dot{Z}l}{R_{\text{ш}}}.$$

Критерием надежности выполнения шунтового режима служит соотношение:

$$k_{\text{шр}} \geq 1, \quad k_{\text{шп}} \geq 1,$$

где $k_{\text{шр}}$, $k_{\text{шп}}$ – коэффициент шунтовой чувствительности к нормативному шунту при наложении его на релейном и питающем конце.

Если коэффициент шунтовой чувствительности при наложении шунта последовательно на релейном, а затем на питающем конце рельсовой линии равен или больше единицы – рельсовая цепь работоспособна.

Фрагмент модели рельсовой цепи в шунтовом режиме работы, реализованная в программе MathCad.

Коэффициенты рельсового четырехполюсника при наложении нормативного шунта на релейном конце:

$$A_{\text{шр}} := 1 + \frac{z \cdot l}{R_{\text{шн}}}, \quad B_{\text{шр}} := z \cdot l, \quad C_{\text{шр}} := \frac{1}{R_{\text{шн}}}, \quad D_{\text{шр}} := 1.$$

Сопротивление передачи рельсовой цепи при наложении шунта на релейном конце:

$$Z_{\text{пшр}} := k'_{\text{тн}} \cdot k_{\text{тк}} \cdot [A_{\text{шр}} \cdot Z_{\text{вк}} + B_{\text{шр}} + (C_{\text{шр}} \cdot Z_{\text{вк}} + D_{\text{шр}}) \cdot Z'_{\text{вн}}].$$

Фактическое напряжение источника питания при наложении шунта на релейном конце:

$$U_{\text{дшр}} := k'_{\text{вн}} \cdot I_{\text{р}} \cdot Z_{\text{пшр}}.$$

Коэффициент шунтовой чувствительности при наложении шунта на релейном конце:

$$k_{\text{шр}} := \frac{|U_{\text{дшр}}|}{|U_{\phi}|}.$$

Коэффициенты рельсового четырехполюсника при наложении нормативного шунта на питающем конце:

$$A_{\text{шп}} := 1, \quad B_{\text{шп}} := z \cdot l, \quad C_{\text{шп}} := \frac{1}{R_{\text{шн}}}, \quad D_{\text{шп}} := 1 + \frac{z \cdot l}{R_{\text{шн}}}.$$

Сопротивление передачи рельсовой цепи при наложении шунта на питающем конце:

$$Z_{\text{пшп}} := k'_{\text{тн}} \cdot k_{\text{тк}} \cdot [A_{\text{шп}} \cdot Z_{\text{вк}} + B_{\text{шп}} + (C_{\text{шп}} \cdot Z_{\text{вк}} + D_{\text{шп}}) \cdot Z'_{\text{вн}}].$$

Фактическое напряжение источника питания при наложении шунта на питающем конце:

$$U_{\text{дшп}} := k'_{\text{вн}} \cdot I_{\text{р}} \cdot Z_{\text{пшп}}.$$

Коэффициент шунтовой чувствительности при наложении шунта на питающем конце:

$$k_{\text{шп}} := \frac{|U_{\text{дшп}}|}{|U_{\phi}|}.$$

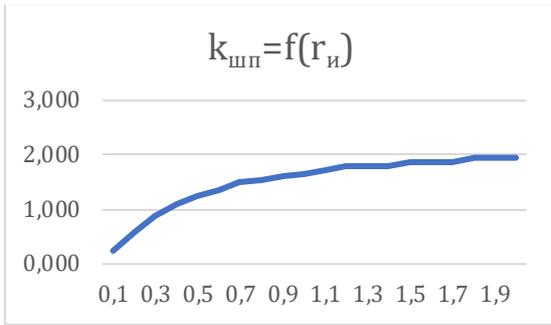


Рис. 7

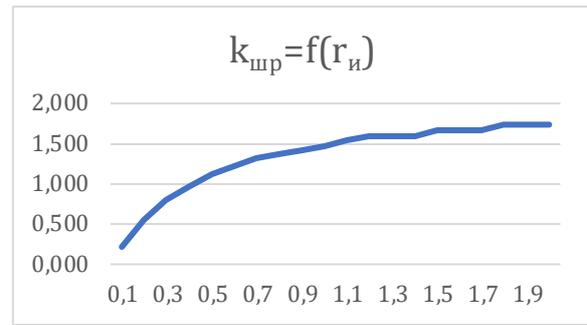


Рис. 8

Графики результатов (рис. 7, рис 8) моделирования шунтового режима показывают, что коэффициенты шунтовой чувствительности превышают значение единицы при сопротивлении изоляции более 4 Ом/км. Это свидетельствует о стабильном выполнении шунтового режима работы при выбранном источнике напряжения питания рельсовой линии.

Моделирование контрольного режима работы рельсовой цепи.

Задача моделирования заключается в проверке условия выполнения контрольного режима работы по критерию чувствительности к повреждению или изъятию рельса. Результатом моделирования является определение максимально допустимого напряжения источника напряжения питания рельсовой цепи, при котором путевое реле надежно сформирует сообщение о повреждении (изъятии) рельса.

Схема замещения рельсовой цепи для контрольного режима имеет вид (рис. 9).

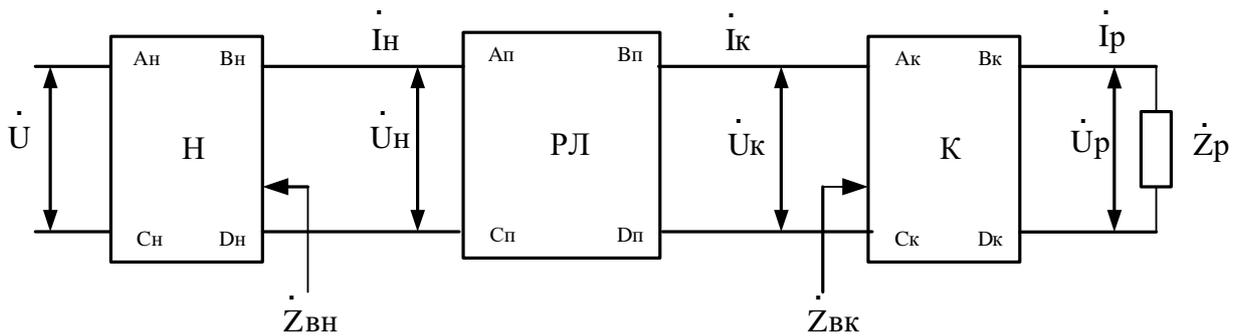


Рис. 9

Коэффициент чувствительности к поврежденному рельсу определяется сравнением допустимого $U_{д пр}$ и фактического $U_{ф}$ напряжения на путевом реле:

$$k_{кп} = \frac{|\dot{U}_{д кр}|}{|\dot{U}_{ф}|},$$

где

$$\dot{U}_{д кр} = k'_{ВН} \dot{I}_p \dot{Z}_{п пр}.$$

Напряжение $U_{ф}$ берется из результатов расчета нормального режима.

Сопротивление передачи схемы замещения:

$$\dot{Z}_{п кр} = k_{ТН} k_{ТК} [A_{кр} \dot{Z}_{вк} + B_{кр} + (C_{кр} \dot{Z}_{вк} + D_{кр}) \dot{Z}_{вн}].$$

Коэффициенты четырехполюсника рельсовой линии при повреждении рельса:

$$A_{кр} = D_{кр} = ch(\gamma l)_{кр} + 0,5E\sqrt{1+2m} sh(\gamma l)_{кр} (S_1 + S_2),$$

$$B_{кр} = \frac{zl}{(\gamma l)_{кр}} \{sh(\gamma l)_{кр} + 0,5E\sqrt{1+2m} [ch(\gamma l)_{кр} + 1](S_1 + S_2)\},$$

$$C_{кр} = \frac{(\gamma l)_{кр}}{\dot{Z}l} \{sh(\gamma l)_{кр} + 0,5E\sqrt{1+2m} [ch(\gamma l)_{кр} - 1](S_1 + S_2)\},$$

где m – коэффициент поверхностной утечки сигнального тока; $(\gamma l)_{кр}$ – критическое значение комплексного числа; S_1 и S_2 – коэффициенты, учитывающие наличие дроссель-трансформаторов соответственно на релейном и питающем концах; E – величина взаимной индукции рельсовых линий, которая определяется из выражения:

$$E = \sqrt{1 + \frac{4e^{j90^\circ} \omega M_{12}}{\dot{Z}}}$$

где ω – круговая частота сигнального тока; M_{12} – взаимная индуктивность двух контуров рельс-земля, \dot{Z} – удельное сопротивление рельсов.

Критерием выполнения контрольного режима является соотношение:

$$k_{кп} \geq 1,$$

где $k_{кп}$ – коэффициент чувствительности рельсовой цепи к обрыву рельсовой нити.

Если коэффициент чувствительности к поврежденному рельсу равен или больше единицы – рельсовая цепь работоспособна режим работы выполняется.

Фрагмент модели рельсовой цепи в контрольном режиме работы, реализованная в программе MathCad.

Коэффициенты четырехполюсника рельсовой линии при повреждении рельсов:

$$M_{кр} := \begin{pmatrix} \cosh(\gamma l_{кр}) + 0.5 \cdot E \cdot \sqrt{1 + 2 \cdot m} \cdot \sinh(\gamma l_{кр}) \cdot (S1 + S2) & \frac{z \cdot l}{\gamma l_{кр}} \cdot [\sinh(\gamma l_{кр}) + 0.5 \cdot E \cdot \sqrt{1 + 2 \cdot m} \cdot (\cosh(\gamma l_{кр}) + 1) \cdot (S1 + S2)] \\ \frac{\gamma \cdot l_{кр}}{z \cdot l} \cdot [\sinh(\gamma l_{кр}) + 0.5 \cdot E \cdot \sqrt{1 + 2 \cdot m} \cdot (\cosh(\gamma l_{кр}) - 1) \cdot (S1 + S2)] & \cosh(\gamma l_{кр}) + 0.5 \cdot E \cdot \sqrt{1 + 2 \cdot m} \cdot \sinh(\gamma l_{кр}) \cdot (S1 + S2) \end{pmatrix}$$

Сопротивление передачи рельсовой цепи:

$$Z_{пк} := k'_{тн} \cdot k_{тк} \cdot [M_{кр0,0} \cdot Z_{вхк} + M_{кр0,1} + (M_{кр1,0} \cdot Z_{вхк} + M_{кр1,1}) \cdot Z'_{вхн}].$$

Допустимое напряжение на путевом реле при повреждении рельсов:

$$U_{дкп} := k'_{вн} \cdot I_p \cdot Z_{пк}.$$

Коэффициент чувствительности к поврежденному рельсу:

$$k_{кп} := \frac{|U_{дкп}|}{|U_{\phi}|}$$

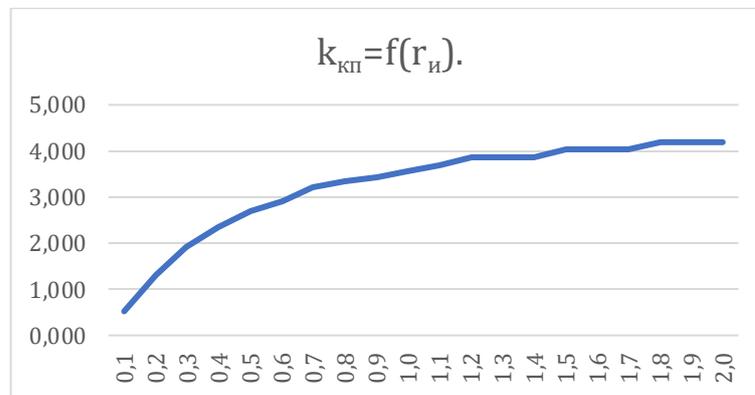


Рис. 10

Результаты моделирования показывают, что при сопротивлении изоляции больше 0.2 Ом/км и выбранном напряжении источника питания рельсовой линии коэффициент чувствительности к повреждению рельса больше единицы. Следовательно, режим работы выполняется.

Моделирование режима короткого замыкания рельсовой цепи.

Целью моделирования является определение мощности источника питания для обеспечения питания рельсовой цепи, когда колесная пара подвижной единицы располагается в точке подключения источника питания к рельсовой линии. При этом предполагается, что выход питающего конца рельсовой цепи нагружен сопротивлением нормативного шунта.

Схема замещения рельсовой цепи представлена на рис. 11.

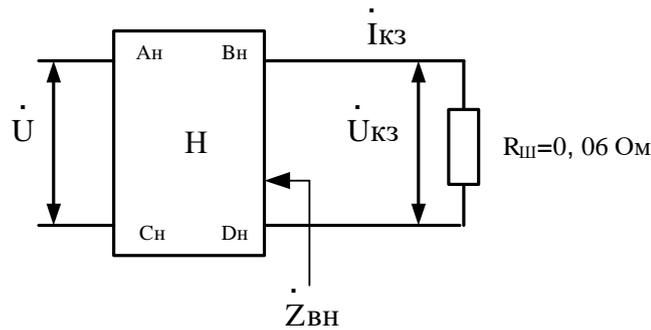


Рис. 11

Мощность, потребляемая рельсовой цепью:

$$\dot{S}_{\text{кз}} = \dot{U}_{\phi} \dot{I}_{\text{кз}}.$$

Ток короткого замыкания источника питания:

$$\dot{I}_{\text{кз}} = k_{\text{ис}} \frac{\dot{U}_{\phi}}{\dot{Z}_{\text{кз}}} = k_{\text{ис}} \frac{\dot{U}_{\phi} D_{\text{Н}}}{B_{\text{Н}}},$$

где \dot{U}_{ϕ} – фактическое напряжение источника питания, $k_{\text{ис}}$ – коэффициент колебания напряжения источника питания, $\dot{Z}_{\text{кз}}$ – сопротивление аппаратуры питающего конца в режиме короткого замыкания, $B_{\text{Н}}$ и $D_{\text{Н}}$ коэффициенты четырехполюсника начала рельсовой цепи.

Если мощность, потребляемая рельсовой цепью в режиме короткого замыкания, превышает более чем на 10% номинальную мощность источника питания, то источник питания необходимо заменить на более мощный.

Фрагмент модели рельсовой цепи в режиме короткого замыкания, реализованная в программе MathCad.

Сопротивление аппаратуры питающего конца:

$$Z_{\text{кз}} := \frac{Mn_{0,1}}{Mn_{1,1}}.$$

Ток короткого замыкания:

$$I_{\text{кз}} := k_{\text{ис}} \cdot \frac{U_{\phi}}{Z_{\text{кз}}}.$$

Мощность, потребляемая рельсовой цепью $S_{\text{кз}} := U_{\phi} \cdot I_{\text{кз}}$.

Моделирование режима АЛС.

Задача моделирования режима АЛС заключается в определении фактической величины кодового тока при наложении нормативного шунта на выходе рельсовой линии. Сравнения его с величиной нормативного тока АЛС, при котором локомотивный приемник работает устойчиво.

Схема замещения рельсовой цепи в режиме АЛС имеет вид рис. 12.

Критерием надежности выполнения режима АЛС служит коэффициент:

$$k_{\text{АЛС}} = \frac{|\dot{I}_{\text{АЛС } \phi}|}{I_{\text{АЛС Н}}},$$

где $\dot{I}_{\text{АЛС } \phi}$ – фактический ток под приемными катушками АЛС при наложении нормативного шунта, $I_{\text{АЛС Н}}$ – нормативный ток АЛС, при котором локомотивный приемник работает устойчиво.

Величина фактического тока АЛС:

$$\dot{I}_{\text{АЛС } \phi} = \frac{\dot{U}_{\phi}}{\dot{Z}_{\text{ПАЛС}}}.$$

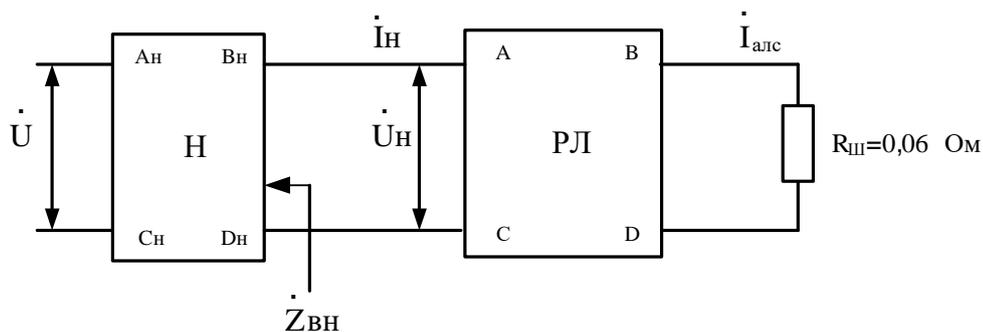


Рис. 12

Сопротивление передачи рельсовой цепи в режиме АЛС:

$$\dot{Z}_{\text{ПАЛС}} = k_{\text{ТН}} [B + D \dot{Z}_{\text{ВН}}],$$

где $k_{\text{ТН}} = A_{\text{Н}}$ – обратный коэффициент снижения тока в четырехполюснике начала; B, D – коэффициенты четырехполюсника рельсовой линии, $\dot{Z}_{\text{ВН}}$ – обратное входное сопротивление четырехполюсника начала рельсовой цепи, которое равно:

$$\dot{Z}_{\text{ВН}} = \frac{B_{\text{Н}}}{A_{\text{Н}}},$$

где $B_{\text{Н}}, A_{\text{Н}}$ – коэффициенты четырехполюсника начала рельсовой цепи.

Если коэффициент чувствительности $k_{\text{АЛС}} \geq 1$ рельсовая цепь способна обеспечить режим АЛС.

Фрагмент модели рельсовой цепи в режиме АЛС, реализованная в программе MathCad.

Сопротивление передачи рельсовой цепи:

$$Z_{\text{пл}} := k'_{\text{ТН}} (M_{\text{рл}_{0,1}} + M_{\text{рл}_{1,1}} \cdot Z'_{\text{ВХН}}).$$

Фактический ток под приемными катушками АЛС:

$$I_{\text{алсф}} := \frac{|U_{\text{ф}}|}{|Z_{\text{пл}}|}$$

Коэффициент чувствительности к току АЛС:

$$k_{\text{алс}} := \frac{I_{\text{алсф}}}{I_{\text{алсн}}}$$

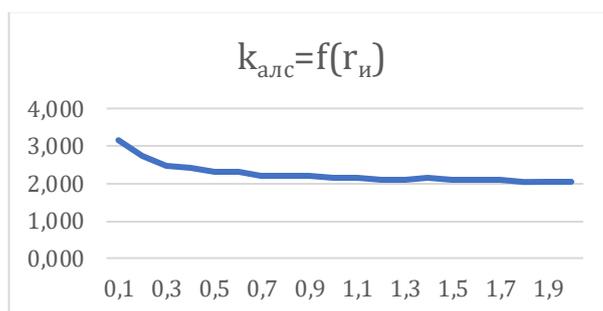


Рис. 13

Результаты моделирования показывают, что коэффициент чувствительности к току АЛС во всем диапазоне изменения сопротивления изоляции рельсовой линии больше единицы. Это свидетельствует о выполнении режима работы.

Заключение

Математическое моделирование рельсовых цепей – важная составляющая часть анализа существующих и синтеза перспективных рельсовых цепей. В связи с дальнейшим совершенствованием структуры и функциональных возможностей рельсовых цепей происходит

непрерывное развитие теории распространения сигналов по рельсовой линии. Чувствительным элементом первичного датчика состояний участков пути являются рельсовые линии, и от того, какой схемой они замещаются при анализе и синтезе рельсовых цепей, существенно зависят результаты. Значения, полученные в курсе математического моделирования рельсовых цепей с распределенными параметрами рельсовых линий, позволяют студентам в дальнейшей работе грамотно эксплуатировать системы интервального регулирования движением поездов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Фидлер Дж. К., Найтингейл К. Машинное проектирование электронных схем: Пер. с англ. – М.: Высшая школа, 1985. – 216 с.
2. Аркатов В.С., Котляренко Н.Ф., Баженов А.И. Рельсовые цепи магистральных железных дорог: Справочник. – М.: Транспорт, 1982. – 360 с.
3. Брылеев А.М., Кравцов Ю.А., Шишляков А.В. Теория, устройство и работа рельсовых цепей. – М.: Транспорт, 1978. – 344 с.
4. Аркатов В.С., Кравцов Ю.А., Степенский Б.М. Рельсовые цепи. Анализ и техническое обслуживание. – М.: Транспорт, 1990. – 295 с.
5. Аркатов В.С., Аркатов Ю.В., Казеев С.В., Ободовский Ю.В. Рельсовые цепи магистральных железных дорог: Справочник – 3-е издание. – М, «ООО Миссия-М». 2006. – 496 с
6. Лисенков В.М. Теория автоматических систем интервального регулирования. – М.: Транспорт, 1987. – 150 с.
7. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники. 3-е изд. – Л.: Энергоиздат, 1981. Т.1, – 533 с., Т2, – 415 с.
8. Теория основы электротехники / Под ред. проф. Ионкина П.А. – М.: Высшая школа, 1976. Т1, – 559 с., Т2, – 383 с.
9. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. 8-е изд. – М.: Высшая школа, 1984. Т1, – 569 с., Т2, – 231 с.
10. Атабеков Г.И. Теоретические основы электротехники, линейные электрические цепи. 5-е изд. – М.: Энергия, 1978. – 591 с.
11. Целищев В.А. Расчет параметров работы рельсовой цепи для участка с электротягой переменного тока: метод. указ. к выполнению курсового проекта / сост. В.А. Целищев. – Иркутск: ИрГУПС. 2016. – 48 с.
12. Каганов З.Г. Электрические цепи с распределенными параметрами и цепные схемы. – М.: Энерготомиздат, 1990. – 248 с.
13. Александрова М.Г. и др. Расчет электрических цепей и электромагнитных полей на ЭВМ Под ред. Данилова П.В. и Филиппова Е.С. - М., Радио и связь, 1983.- 344 с.
14. Бушуев А.В. Рельсовые цепи. Теоретические основы и эксплуатация: монография / А.В. Бушуев, В.И. Бушуев, С.В. Бушуев. – Екатеринбург: Изд. УрГУПС. 2014. – 311 с.
15. Волков Е.А., Санковский Э.И., Сидорович Д.Ю. Теория линейных электрических цепей железнодорожной автоматики, телемеханики и связи: Учебник для вузов ж-д транспорта / Под ред. проф. В.А. Кудряшова. – М.: Маршрут. 2005. – 509 с.

REFERENCES

1. Fidler J.K., Nightingale K. Machine design of electronic circuits: Trans. Moscow: Vysshaya Shkola. 1985. - 216 p.
2. Arkatov V.S., Kotlyarenko N.F., Bazhenov A.I. Rail chains of Main Roads: Handbook. Moscow: transport publ., 1982. - 360 p.
3. Brylev A.M., Kravtsov Y.A., Shishlyakov A.V. Theory, device and operation of rail chains. Moscow: Transport. 1978. - 344 p.
4. Arkatov V.S., Kravtsov Y.A., Stepensky B.M. Rail chains. Analysis and maintenance. Moscow: Transport. 1990. - 295 p.

5. Arkatov V.S., Arkatov Y.V., Kazeev S.V., Obodovsky Y.V. Rail chains of railway magicians: Handbook-3rd edition. - M, "Mission-M LLC". 2006. - 496 p.
6. Lysenkov V.M. Theory of automatic interval control systems. Moscow: Transport publ., 1987. - 150 p.
7. Neumann L.R., Demirchyan K.S. Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki : Moscow: Energoizdat. 1981, Vol. T1, - 533 p., T2, - 415 p.
8. Teoriya osnovy elektrotekhniki. Edited by prof. Ionkin P.A. Moscow: Vysshaya Shkola. 1976, T1, - 559 p., T2, - 383 p.
9. Bessonov L.A. Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki. Moscow: Vysshaya Shkola. 1984, T1, - 559 p., T2, - 231 p.
10. Atabekov G.I. Theoretical foundations of Electrical Engineering, linear electrical circuits. Moscow: Energiya. 1978. - 591 p.
11. Tselishchev V.A. Calculation of parameters of rail chain operation for a section with alternating current: Method. decree. to complete the course project / comp. V.A. Tselishchev. - Irkutsk: IrGUPS. 2016. - 48 p.
12. Kaganov Z.G. Electrical circuits with distributed parameters and chain circuits. Moscow: Energotomizdat. 1990, - 248 p.
13. Alexandrova M.G. Calculation of electric circuits and electromagnetic fields on EVM. Edited by P.V. Danilov and E.S. Filippov, Moscow, radio and communications, 1983. - 344 p.
14. Bushuev A.V. Bushuev A.V., Bushuev V.I., and Bushuev S.V. Teoreticheskie osnovy i operatsiya: monografiya. - Yekaterinburg: Ed. UrGUPS. 2014. - 311 p.
15. Volkov E.A., Sankovsky E.I., Sidorovich D. Y. Theory of linear electric chains of railway automation, telemechanics and communications. / ed. by prof. V.A. Kudryashov. - M.: Route. 2005. - 509 p.

Информация об авторах

Целищев Владимир Александрович – доцент кафедры «Автоматика, телемеханика и связь» Иркутского государственного университета путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: Tselishev_VA@irgups.ru.

Author

Tselishchev Vladimir Aleksandrovich – Assistant Professor of Automatic, Telemechanic and Telecommunication Systems Department of Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: Tselishev_VA@irgups.ru.

Для цитирования

Целищев В.А., Математическое моделирование режимов работы рельсовых цепей // «Информационные технологии и математическое моделирование в управлении сложными системами»: электрон. науч. журн. – 2024. – №3. – С.1-13. – Режим доступа: <http://ismm-irgups.ru/toma/323-2024>.

For citations

Tselishchev V.A. Mathematical modeling of the modes of operation of rail circuits // «Informativnye tekhnologii i matematicheskoe modelirovanie v upravlenii slozhnymi sistemami»: elektron. nauch. zhurn – 2024. – No.3. – P. 1-13. – Rezhim dostupa: <http://ismm-irgups.ru/toma/323-2024>