
Системы и устройства автоматики и телемеханики

УДК 656.254.16:656.21

Ю. А. Кравцов, д-р техн. наук

Кафедра «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте»,
Московский государственный университет путей сообщения

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ РЕЛЬСОВЫХ ЦЕПЕЙ И ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА С АСИНХРОННЫМ ТЯГОВЫМ ПРИВОДОМ

Получены выражения для расчета тока гармоник в рабочей полосе путевого приемника. Приведены блок-схемы алгоритмов определения критических характеристик контрольного режима и расчета допустимого уровня гармоник тягового тока электроподвижного состава с асинхронным тяговым приводом. Описана методика экспериментальной проверки помехоустойчивости путевых приемников рельсовых цепей тональной частоты. Выполнен анализ нормативов по электромагнитной совместимости подвижного состава и рельсовых цепей и методов их проверки, применяемых на российских железных дорогах. Проанализирован европейский стандарт, посвященный нормам электромагнитной совместимости электроподвижного состава и рельсовых цепей. Сравниваются результаты обработки записей переменной составляющей тягового тока в частотной и во временной области.

тяговый электропривод; рабочая полоса частот; путевой приемник; сигнал; путевой генератор; гармоника тягового тока; коэффициент влияния; обрыв рельсовой нити; сбой; полином; контактный провод; электроподвижной состав; электромагнитная совместимость; нормальный режим работы рельсовой цепи

Введение

Проблема обеспечения электромагнитной совместимости рельсовых цепей с перспективным электроподвижным составом – важная стратегическая задача развития отрасли автоматизации и телемеханики. Наиболее остро вопросы электромагнитной совместимости встали в последние годы в связи с разработкой и внедрением на сети железных дорог перспективных типов электроподвижного состава с современными видами тяговых преобразователей и электроподвижного состава двойного питания, разрабатываемых такими производителями, как «Сименс», «Трансмашхолдинг», «Альстом», «Синара».

Род тяги, а точнее, вид тягового привода электроподвижного состава, является одним из важнейших факторов, определяющих вид рельсовой цепи, которая является фундаментом всех современных систем автоматики. Как известно, всякий раз смена рода тяги сопровождалась реконструкцией рельсовых цепей. Так, переход от паровой тяги к электрической с энергоснабжением на постоянном токе и применением коллекторного двигателя потребовал разработки рельсовых цепей переменного тока частотой 50 Гц. Переход на энергоснабжение переменным током, с установкой выпрямителя для коллекторного двигателя непосредственно на электровозе, привел к тому, что свободными от помех оказались только диапазоны между гармониками тока частотой 50 Гц. Были созданы рельсовые цепи частотой 25 Гц для станций и числовой кодовой автоблокировки и автоматической локомотивной сигнализации (АЛСН); рельсовые цепи частотой 175 Гц для многозначной системы локомотивной сигнализации (АЛС-ЕН), а также тональные рельсовые цепи, рабочие диапазоны которых расположены между гармониками тягового тока.

В настоящее время наблюдается тенденция, связанная с заменой на тяговом подвижном составе коллекторного двигателя на асинхронный, как при энергоснабжении на постоянном токе, так и при энергоснабжении на переменном токе. Поскольку тяга регулируется путем изменения частоты тока, потребляемого асинхронным двигателем, гармоники сетевого тока электровоза возникают в очень широком диапазоне частот, в том числе и в том, в котором работают рельсовые цепи. Это принципиально изменяет требования к рельсовым цепям.

Проблема электромагнитной совместимости электроподвижного состава и рельсовых цепей решается путем предъявления жестких требований к уровню помех, допустимому при работе асинхронного двигателя. Эти требования включены в ГОСТ [1]. Рельсовые цепи должны проектироваться с учетом мешающего влияния помех, создаваемых электроподвижным составом. Поэтому необходимо разработать методы расчета распределения гармоник тягового тока в рельсовых цепях с учетом асимметрии первичных параметров в рельсовой линии.

Опасному влиянию гармоник тягового тока подвержены фазочувствительные рельсовые цепи частотой 25 и 50 Гц с реле ДСШ, которое может сработать и замкнуть фронтные контакты, если уровень, частота и фаза гармоник тягового тока на путевом элементе будут иметь соответствующие значения. В связи с этим необходимо создание бортовой системы диагностирования на электровозе с асинхронным тяговым двигателем, обеспечивающей исключение опасных ситуаций в случае превышения переменными составляющими тягового тока допустимого значения.

В условиях расширения взаимодействия РЖД с зарубежными партнерами необходимо совершенствование нормативной базы прежде всего на принципах гармонизации с европейскими стандартами [2].

1 Уравнения распространения напряжений и токов в двухпроводной рельсовой линии, учитывающие взаимную индуктивность контактного провода и рельсов

Для анализа работы рельсовых цепей с учетом воздействия тягового тока и его гармонических составляющих уравнения распространения напряжений и токов в рельсовой линии выведены на основе схемы замещения элемента dx рельсовой линии, изображенной на рис. 1. На рис. 1 использованы следующие обозначения:

- z_1, z_2 – удельные сопротивления одиночных рельсов;
- z_M – сопротивление взаимной индуктивности рельсовых нитей;
- $z_{МКР}$ – сопротивление взаимной индуктивности контактного провода и каждой рельсовой нити;
- z_K – удельное сопротивление контактного провода;
- g_1, g_2 – удельная проводимость заземления рельсовых нитей;
- g_{12} – удельная проводимость верхнего слоя балласта и шпал;
- x – расстояние от элемента dx до конца рельсовой линии, где подключена нагрузка;
- $\dot{I}_{1x}, \dot{I}_{2x}$ – соответственно токи в первой и второй рельсовых нитях с положительным направлением от питающего конца к нагрузке;

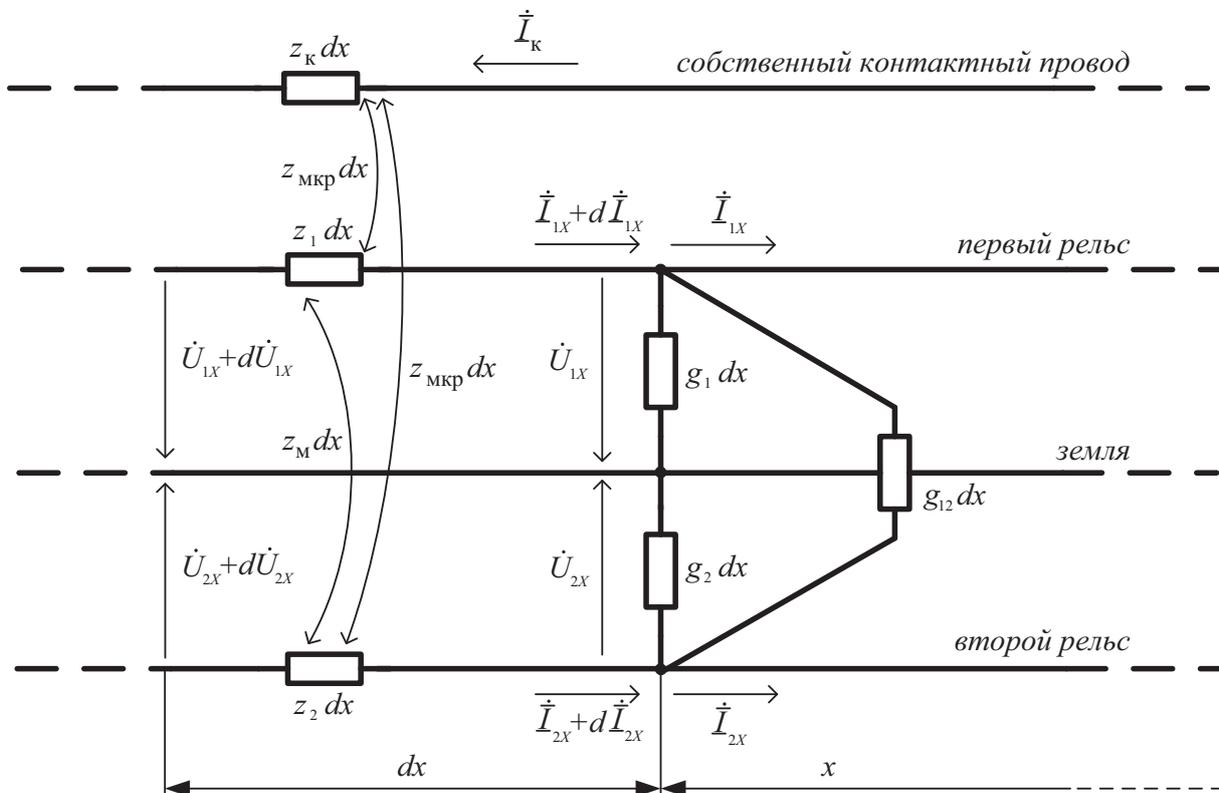


Рис. 1. Схема замещения элемента dx рельсовой линии

$\dot{U}_{1x}, \dot{U}_{2x}$ – напряжение соответственно первой и второй рельсовых нитей относительно земли с положительным направлением от рельсов к земле;

\dot{I}_k – ток, протекающий в контактном проводе с положительным направлением от тяговой подстанции.

Дифференциальные уравнения для напряжений и токов рельсовой линии имеют вид:

$$\begin{aligned}\frac{d\dot{U}_{1x}}{dx} &= z_1 \dot{I}_{1x} + z_M \dot{I}_{2x} - z_{\text{МКР}} \dot{I}_k; \\ \frac{d\dot{I}_{1x}}{dx} &= (g_1 + g_{12}) \dot{U}_{1x} - g_{12} \dot{U}_{2x}; \quad \frac{d\dot{U}_{2x}}{dx} = z_2 \dot{I}_{2x} + z_M \dot{I}_{1x} - z_{\text{МКР}} \dot{I}_k; \\ \frac{d\dot{I}_{2x}}{dx} &= (g_2 + g_{12}) \dot{U}_{2x} - g_{12} \dot{U}_{1x}.\end{aligned}$$

Проводимость «контактный провод – земля» принимается равной нулю, т. е. $\frac{d\dot{I}_k}{dx} = 0$.

В результате решения системы дифференциальных уравнений получим:

$$\begin{aligned}\dot{U}_{1x} &= A_1 ch\gamma_1 x + A_2 sh\gamma_1 x + A_3 ch\gamma_2 x + A_4 sh\gamma_2 x; \\ \dot{U}_{2x} &= M(A_1 ch\gamma_1 x + A_2 sh\gamma_1 x) + N(A_3 ch\gamma_2 x + A_4 sh\gamma_2 x); \\ \dot{I}_{1x} &= y_{11}(A_1 sh\gamma_1 x + A_2 ch\gamma_1 x) + y_{12}(A_3 sh\gamma_2 x + A_4 ch\gamma_2 x) + \dot{I}_k \frac{z_{\text{МКР}}(z_2 - z_M)}{z_1 z_2 - z_M^2}; \\ \dot{I}_{2x} &= y_{21}(A_1 sh\gamma_1 x + A_2 ch\gamma_1 x) + y_{22}(A_3 sh\gamma_2 x + A_4 ch\gamma_2 x) + \dot{I}_k \frac{z_{\text{МКР}}(z_1 - z_M)}{z_1 z_2 - z_M^2},\end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned}M &= \frac{\gamma_1^2 - z_1(g_1 + g_{12}) + z_M g_{12}}{z_M(g_2 + g_{12}) - z_1 g_{12}}; \quad N = \frac{\gamma_2^2 - z_1(g_1 + g_{12}) + z_M g_{12}}{z_M(g_2 + g_{12}) - z_1 g_{12}}; \\ y_{11} &= \gamma_1 \frac{z_2 - M z_M}{z_1 z_2 - z_M^2}; \quad y_{12} = \gamma_2 \frac{z_2 - N z_M}{z_1 z_2 - z_M^2}; \quad y_{21} = \gamma_1 \frac{M z_1 - z_M}{z_1 z_2 - z_M^2}; \quad y_{22} = \gamma_2 \frac{N z_1 - z_M}{z_1 z_2 - z_M^2};\end{aligned}$$

γ_1 – коэффициент распространения волны земляного тракта двухпроводной рельсовой линии,

$$\gamma_1 = \sqrt{\frac{1}{2}(g_{12}(z_1 + z_2 - 2z_M) + g_1 z_1 + g_2 z_2) + \sqrt{\frac{1}{4}(g_{12}(z_1 + z_2 - 2z_M) + g_1 z_1 + g_2 z_2)^2 - (z_1 z_2 - z_M^2)(g_1 g_2 + g_1 g_{12} + g_2 g_{12})}} \rightarrow$$

γ_2 – коэффициент распространения волны фазового тракта двухпроводной рельсовой линии,

$$\gamma_2 = \sqrt{\frac{1}{2}(g_{12}(z_1 + z_2 - 2z_M) + g_1 z_1 + g_2 z_2) - \sqrt{\frac{1}{4}(g_{12}(z_1 + z_2 - 2z_M) + g_1 z_1 + g_2 z_2)^2 - (z_1 z_2 - z_M^2)(g_1 g_2 + g_1 g_{12} + g_2 g_{12})}} \rightarrow$$

Данные выражения являются основой для математического описания работы рельсовой цепи с учетом влияния тягового тока и его гармонических составляющих.

2 Методика расчета уровня гармоник тягового тока в полосе пропускания путевого приемника рельсовой цепи с изолирующими стыками в контрольном режиме

Влияние тягового тока на работу рельсовых цепей в нормальном режиме рассмотрено в [3, 4]. Эквивалентная электрическая схема станционной рельсовой цепи, примыкающей к отсосу тяговой подстанции и в наибольшей степени подверженной воздействию обратного тягового тока электроподвижного состава, в контрольном режиме приведена на рис. 2.

На схеме рис. 2 введены следующие обозначения:

$Z_{вх1}, Z_{вх2}$ – входные сопротивления, учитывающие влияние смежных рельсовых цепей, определяются по формуле $Z_{вх1,2} = \frac{1}{4y_{11}}$;

$Z_{н1}, Z_{н2}$ – приведенное сопротивление аппаратуры источника и приема сигнала рельсовых цепей соответственно;

$R_{зТП}$ – сопротивление заземляющего контура тяговой подстанции.

Пусть начало координат будет в месте обрыва рельсовой линии, тогда граничные условия для определения постоянных интегрирования будут иметь вид:

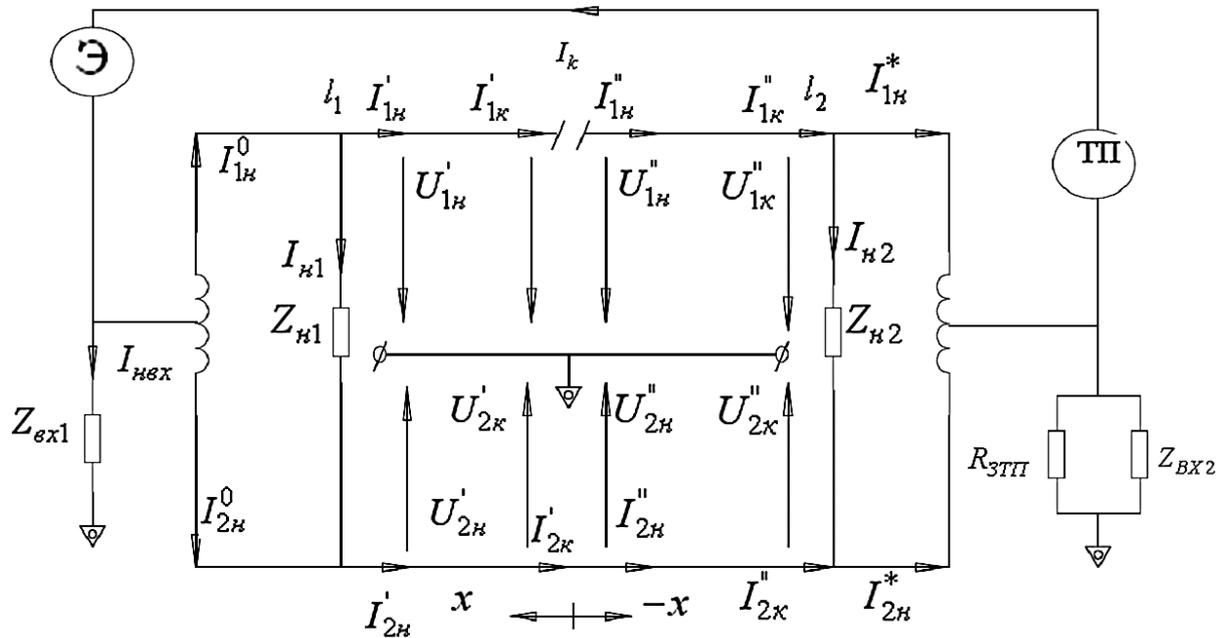


Рис. 2. Схема замещения рельсовой цепи с изолирующими стыками, примыкающей к отсосу тяговой подстанции

при $x = l_1$:

$$I_k - I_{НВХ} - I_{1Н}^{\circ} - I_{2Н}^{\circ} = 0;$$

$$I_{1Н}^{\circ} - I_{Н1} - I_{2Н}^{\circ} = 0;$$

$$I_{2Н}^{\circ} - I_{Н1} - I_{2Н}^{\circ} = 0;$$

$$\left(\frac{U'_{1Н} - U'_{2Н}}{Z'_{1Н}} \right) 2 - I'_{2Н} + I'_{1Н} = 0;$$

$$\frac{U'_{1Н} + U'_{2Н}}{2Z'_{ВХ1}} + I'_{1Н} + I'_{2Н} = I_k;$$

при $x = 0$:

$$I'_{1к} = 0;$$

$$I'_{2к} = I''_{2н}; I'_{2к} - I''_{2н} = 0;$$

$$U'_{2к} = U''_{2н}; U'_{2к} - U''_{2н} = 0;$$

$$I''_{1н} = 0;$$

при $x = -l_2$:

$$\begin{aligned} I_{1к}'' - I_{H_2} - I_{1H}^* &= 0; \\ I_{2к}'' - I_{H_2} - I_{2H}^* &= 0; \\ I_{1к}'' - I_{2к}'' - 2 \frac{U_{1к}'' - U_{2к}''}{Z_{H_2}} &= 0; \\ I_{1к}'' + I_{2к}'' - \frac{U_{1к}'' + U_{2к}''}{2Z_{ВХЭ}} &= I_{к}; \\ Z_{ВХЭ} &= R_{ЗТП} \parallel Z_{ВХ2}. \end{aligned}$$

На основании приведенных граничных условий находятся постоянные интегрирования $A_1', A_2', A_3', A_4', A_1'', A_2'', A_3'', A_4''$, что в дальнейшем позволяет определить любой ток или напряжение в цепи в зависимости от тока в контактом проводе.

Определим ток, протекающий через аппаратуру генерации и приема сигнала рельсовых цепей:

$$\begin{aligned} I_{H1} &= \frac{U_{1H}' - U_{2H}'}{Z_{H1}} \text{ при } x = l_1; \\ I_{H1} &= \frac{2}{Z_{H1}} (A_3' ch(\gamma_2 L_1) + A_4' sh(\gamma_2 L_1)); \\ I_{H2} &= \frac{U_{1к}'' - U_{2к}''}{Z_{H2}} \text{ при } x = -l_2; \\ I_{H2} &= \frac{2}{Z_{H2}} (A_3'' ch(\gamma_2 (L_3 - L_1)) - A_4'' sh(\gamma_2 (L_3 - L_1))). \end{aligned}$$

Введем коэффициент влияния $K_{вл}$, определяющий долю гармоники тягового тока электровоза частотой f , оказывающей мешающее влияние на аппаратуру генерации и приема сигнала рельсовых цепей:

$$K_{вл1} = \left| \frac{I_{H1}}{I_{к}} \right|, K_{вл2} = \left| \frac{I_{H2}}{I_{к}} \right|. \quad (1)$$

Коэффициент влияния $K_{вл}$ позволяет определить ту часть тока электроподвижного состава, которая оказывает воздействие на аппаратуру рельсовой цепи в контрольном режиме.

3 Критерий чувствительности рельсовой цепи к обрыву рельсовой нити с учетом воздействия тока электроподвижного состава с асинхронным тяговым приводом

При заданных типе, частоте f и длине L рельсовой цепи коэффициент влияния, как следует из рис. 2, является функцией двух аргументов: сопротивления изоляции $R_{из}$ и расстояния L_0 до места обрыва рельсовой линии $K_{вл}(R_{из}, L_0)$.

Ток на входе приемника от путевого генератора при оборванной рельсовой линии также является функцией этих двух аргументов при фиксированных типе, частоте и длине РЦ $I_{НОР}(R_{из}, L_0)$ [5].

Для путевых приемников типа ПП1 рельсовых цепей тональной частоты экспериментально получена зависимость, где значения токов выражены в мА:

$$I_{нГ} = -1,485I_{НОР} + 3,509. \quad (2)$$

На основании (2) выражение для расчета критерия чувствительности рельсовой цепи к обрыву рельсовой нити $K_{ОРАП}$ с учетом воздействия тока электроподвижного состава с асинхронным тяговым приводом примет вид:

$$K_{ОРАП} = \frac{K_{в}(-1,485I_{НОР} + 3,509)|K_{тк}|}{1000 \cdot |K_{вл}|I_{к}}, \quad (3)$$

где $K_{в}$ – коэффициент возврата приемника; $K_{тк}$ – коэффициент снижения тока, при передаче сигнала через устройства согласования в конце рельсовой линии [5]; $K_{вл}$ – коэффициент влияния, определяется по формулам (1); $I_{к}$ – ток гармоники в контактом проводе (среднеквадратичное значение (СКЗ)), А.

Ток $I_{НОР}$ может быть выражен следующим образом:

$$I_{НОР} = \frac{E_{эмакс}}{|Z_{пок}|};$$

$$E_{эмакс} = 0,001I_{р}K_{з}|K_{тк}|K_{и}|Z_{по}|, \quad (4)$$

где $Z_{по}, Z_{пок}$ – приведенные сопротивления передачи основной схемы замещения рельсовой цепи в нормальном и контрольном режимах; $I_{р}$ – ток срабатывания приемника, мА; $K_{з}$ – коэффициент запаса; $K_{и}$ – коэффициент колебаний напряжения на выходе путевого генератора в зависимости от напряжения питающей сети ($K_{и} = \frac{U_{макс}}{U_{мин}}$).

$E_{\text{эмакс}}$ – ЭДС эквивалентного генератора в основной схеме замещения рельсовой цепи [5].

С учетом (4) получим:

$$K_{\text{ОРАП}} = \frac{K_{\text{в}} (3,509 |K_{\text{ТК}}| \cdot |Z_{\text{ПОК}}| - 1,485 \cdot 10^{-3} I_{\text{р}} K_{\text{з}} |K_{\text{ТК}}|^2 K_{\text{и}} |Z_{\text{ПО}}|)}{1000 |K_{\text{вл}}| \cdot |Z_{\text{ПОК}}| I_{\text{к}}}. \quad (5)$$

Коэффициенты в уравнениях (3) – (5) 1000 и 0,001 используются для представления тока срабатывания приемника в амперах.

При расчете контрольного режима критическое место обрыва и критическое сопротивление изоляции необходимо определять с учетом воздействия гармоник тягового тока электроподвижного состава.

Блок-схема алгоритма определения критических характеристик контрольного режима при заданных значениях параметров схемы рельсовой цепи и тока гармоники электроподвижного состава с частотой, совпадающей с несущей амплитудно-манипулированного сигнала контроля рельсовой цепи, приведена на рис. 3. Расчеты производятся последовательно для различных мест обрыва рельсовой нити: L_{oi}^* , $L_{oi}^* + \Delta L_o$ и т. д. Сначала задаются исходным расстоянием до места обрыва L_{o1}^* . Для него рассчитывается минимальное значение $K_{\text{ОРАП1}}^*(R_{\text{из1}}^*, L_{o1}^*)$ в зависимости от сопротивления изоляции. После определения $K_{\text{ОРАП1}}^*(R_{\text{из1}}^*, L_{o1}^*)$ аналогично рассчитывается $K_{\text{ОРАП2}}^*(R_{\text{из2}}^*, L_{o2}^*)$ при следующем значении расстояния до места обрыва.

Из полученного множества значений $K_{\text{ОРАП}i}^*(R_{\text{из}i}^*, L_{oi}^*)$ выбирается минимальное, при этом $(R_{\text{из}i}^*, L_{oi}^*)$ являются искомыми критическими характеристиками контрольного режима. Для всех реальных значений длин рельсовых цепей, используемых в эксплуатации, при фиксированной частоте сигнала аналогичным образом рассчитываются критические характеристики контрольного режима при воздействии гармоник тягового тока.

Для каждой пары $L_{ок}$ и $R_{\text{изк}}$ рассчитаны $K_{\text{вл1}}$, $K_{\text{вл2}}$, которые приведены в табл. 1.

На основе результатов вычисления $K_{\text{вл1}}$, $K_{\text{вл2}}$ можно сделать вывод о том, что на аппаратуру генерации и приема сигнала рельсовой цепи с изолирующими стыками оказывают приблизительно одинаковое влияние гармоники тягового тока в полосе пропускания путевого приемника при критических значениях расстояния от места обрыва и сопротивления изоляции.

Зависимость $K_{\text{вл2}}$ от сопротивления изоляции $R_{\text{из}}$ при критическом месте обрыва $L_{ок}$ для различных длин рельсовой цепи для частоты 420 Гц представлена на рис. 4.

Анализ рисунка 5 показывает, что при обрыве рельсовой нити в критическом месте с увеличением сопротивления изоляции влияние гармоник тягового тока возрастает, а при увеличении длины рельсовой цепи влияние гармоник уменьшается. Действительно, при прочих равных условиях для рельсовой цепи

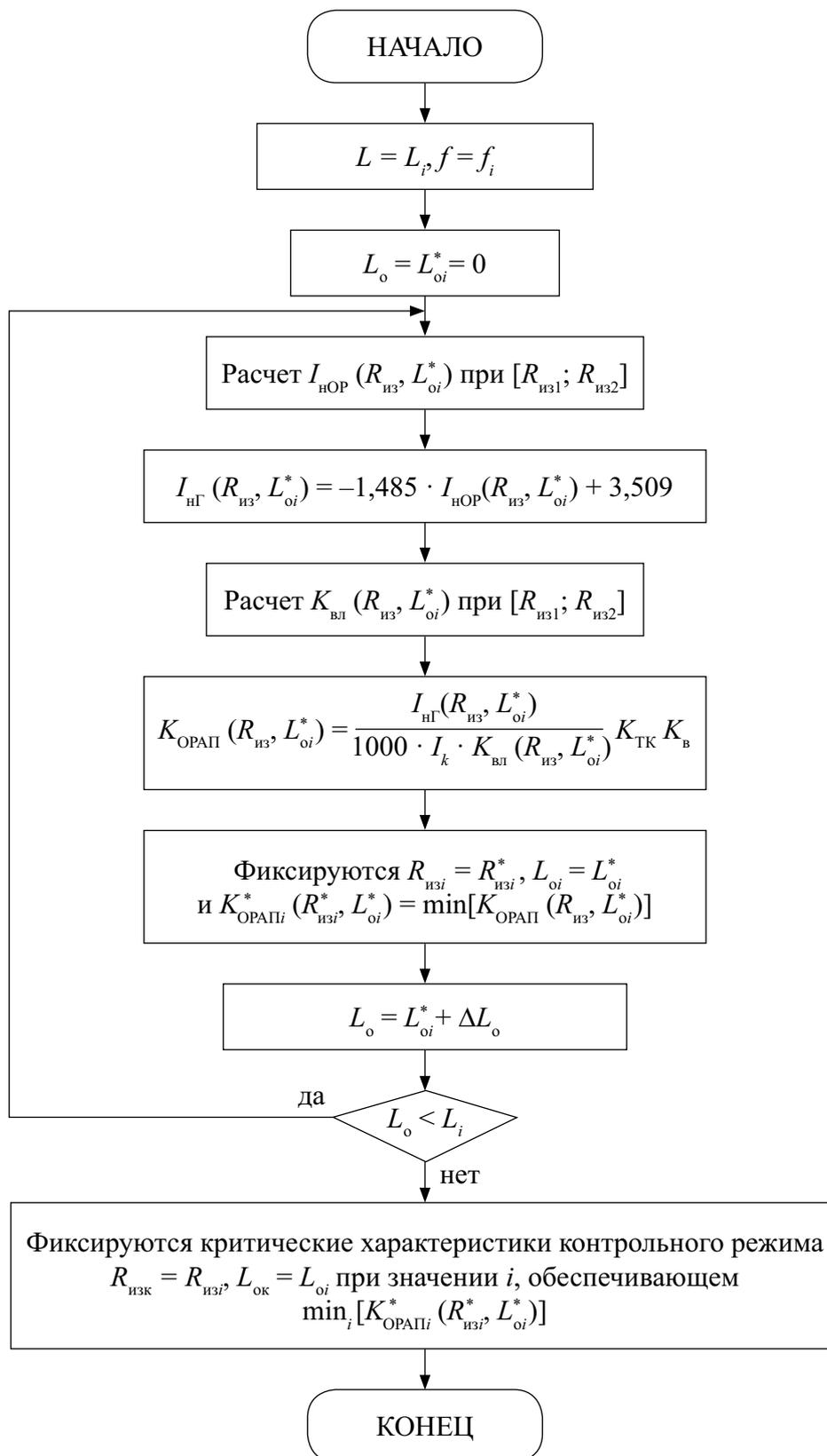


Рис. 3. Блок-схема алгоритма определения критических характеристик контрольного режима

Таблица 1. Значения $K_{вл1}$, $K_{вл2}$ для центральной частоты ТРЦЗ 420 Гц при критических значениях сопротивления изоляции $R_{изк}$ и расстояния до места обрыва $L_{ок}$

Длина РЦ, км	Расстояние до места обрыва критическое, км	Сопротивление изоляции критическое, Ом·км	$K_{вл1}$	$K_{вл2}$
0,4	0,15	0,56	0,238	0,217
0,6	0,25	1,01	0,232	0,217
0,8	0,36	1,51	0,224	0,215
1,0	0,46	2,16	0,222	0,214
1,2	0,56	2,91	0,220	0,214

ТРЦЗ длиной 0,4 км и с частотой сигнала 420 Гц влияние тягового тока максимально.

Блок-схема алгоритма расчета допустимого уровня гармоник тягового тока на фиксированной частоте при заданной длине рельсовой цепи приведена на рис. 5 [6]. В этом случае задаются различными значениями тока гармоник I_k . Для каждого значения определяют $K_{ОРАП}$ при критическом месте обрыва и сопротивлении изоляции, которые считаются известными в результате выполнения алгоритма по блок-схеме рис. 3. Значение I_k , при котором $K_{ОРАП} = 1$ является максимально допустимым.

4 Экспериментальная проверка помехоустойчивости путевых приемников рельсовых цепей тональной частоты

Переменная составляющая тока в цепи средней точки ДТ измеряется в разных режимах движения электроподвижного состава. Схема измерений приведена на рис. 6.

В качестве датчика тока используется катушка Роговского типа *FLUKE I3000s*, запись осуществляется на регистратор *A17-U8*.

Для экспериментальной оценки в лабораторных условиях воздействия помех на работу путевых приемников ТРЦ во время измерений записи переменной составляющей тока в цепи средней точки ДТ необходимо уменьшить, преобразовать в аналоговую форму и подать на вход приемника.

Схема стенда для эксперимента приведена на рис. 7.

Напряжения АМ сигналов устанавливаются с помощью регулировочного элемента генератора ГПЗ1 и регулируемого резистора R1, сопротивление которого должно быть не менее 1,5 кОм, и контролируются мультиметром типа В7–63 на входах 11–43 приемника.

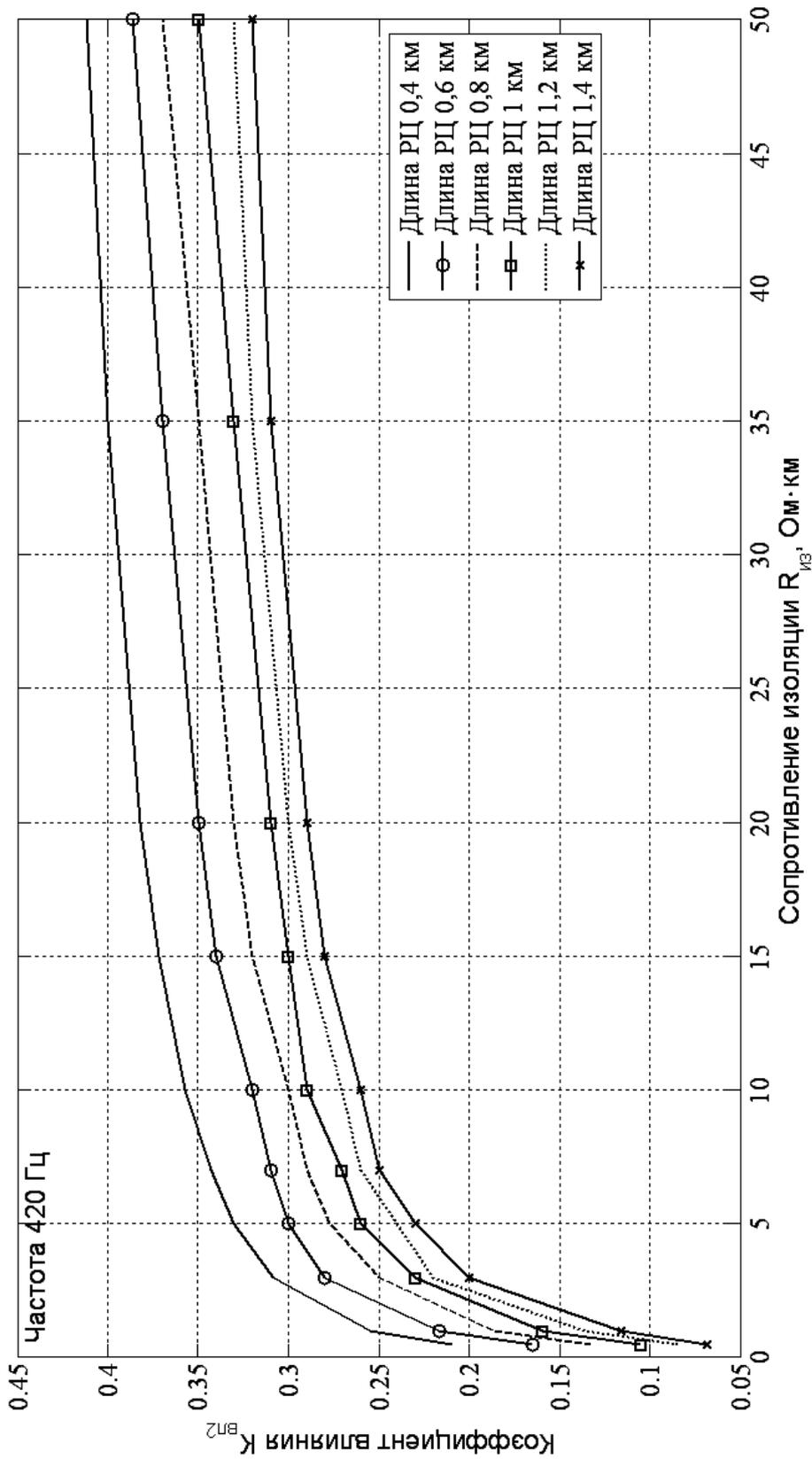


Рис. 4. Зависимость $K_{вн2}$ от сопротивления изоляции $R_{из}$ при критическом месте обрыва $L_{ок}$ для различных длин рельсовой цепи для частоты 420 Гц

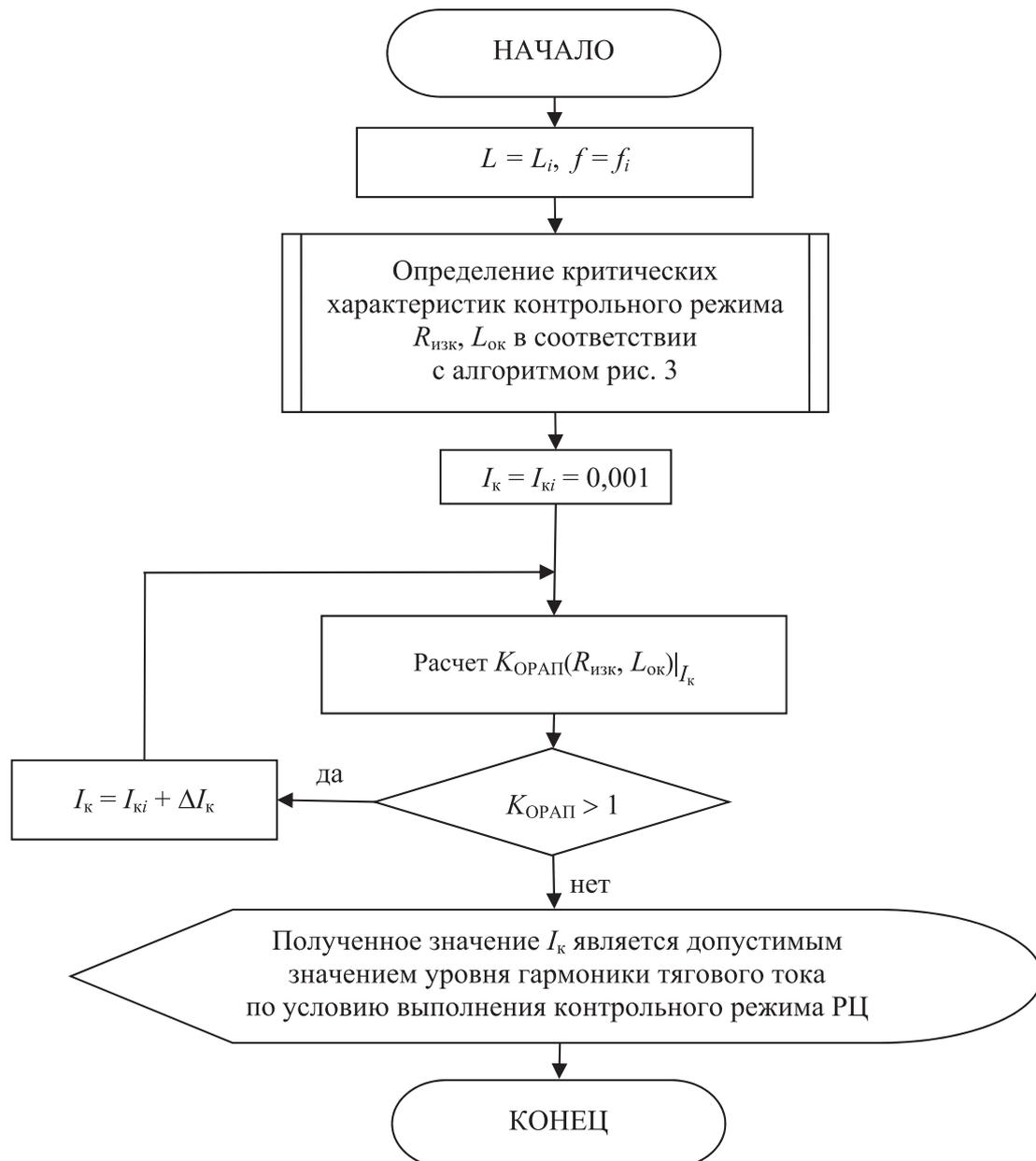


Рис. 5. Блок-схема алгоритма расчета допустимого уровня гармоник тягового тока

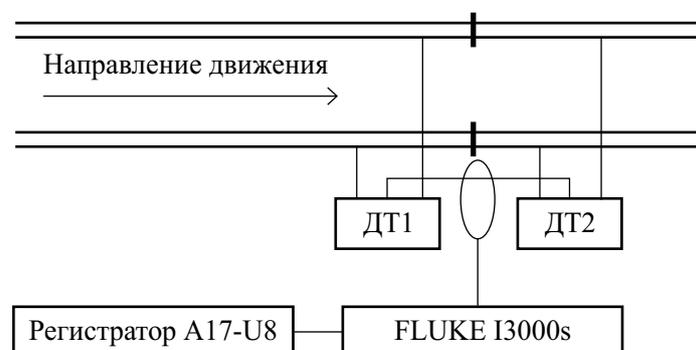


Рис. 6. Схема измерений

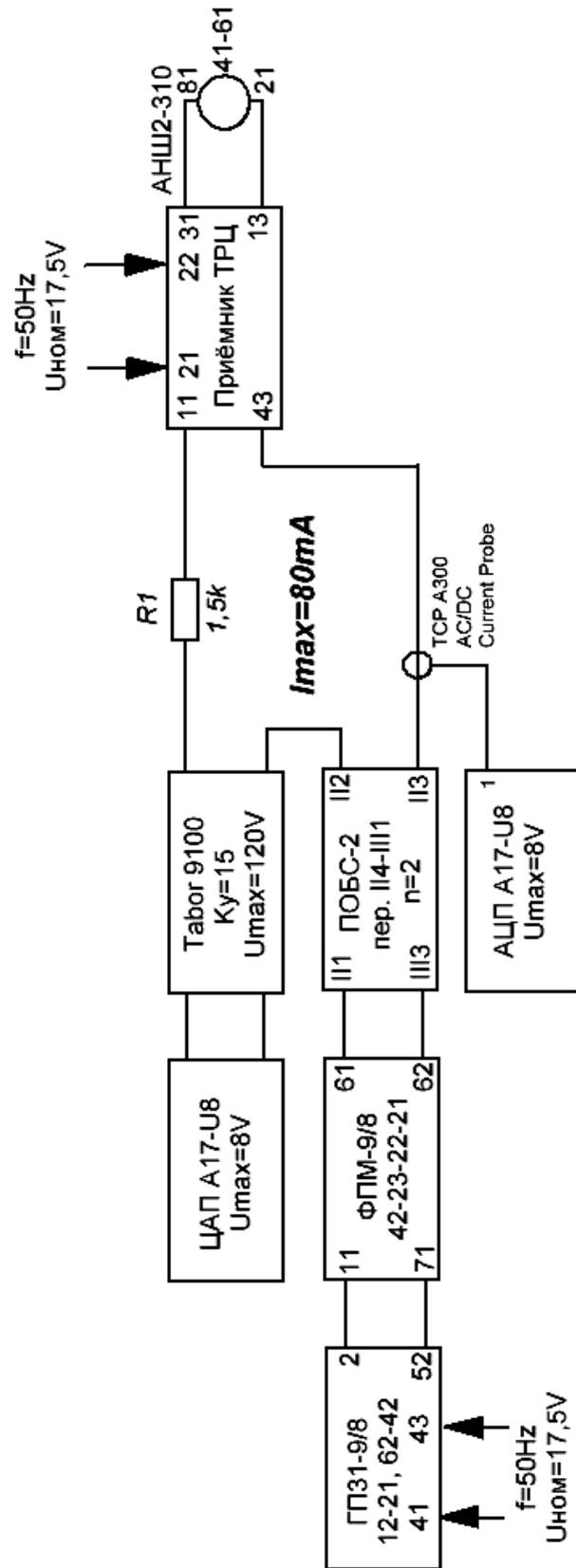


Рис. 7. Функциональная схема стенда по проверке помехоустойчивости путевого приемника

На вход усилителя с помощью ЦАП подается запись переменной составляющей тягового тока. Для каждой записи тока определяется свой коэффициент нормирования.

Нормирование записей производится для исключения искажений, вызываемых ограничением максимального значения выходного напряжения усилителя *TAVOR 9100*, используемого в стенде, на уровне 120 В. Все файлы записей переменной составляющей тока в цепи средней точки ДТ нормированы таким образом, чтобы пиковое значение напряжения не превышало 120 В, а пиковое значение тока не превышало бы 80 мА.

Величина тока помехи на входе приемника $I_{\text{пом}}$ вычисляется по формуле:

$$I_{\text{пом}} = \frac{I_{\Gamma} \cdot 0,5 \cdot K_{\text{ас}}}{40},$$

где I_{Γ} – переменная составляющая тока электровоза ЭП-20 в средней точке ДТ; $K_{\text{ас}}$ – коэффициент асимметрии токов в полуобмотках ДТ; 40 – коэффициент трансформации ДТ-0,2.

На основании приведенной формулы рассчитывается коэффициент асимметрии, при котором определяется помехоустойчивость путевого приемника.

При испытаниях приемника генерируемый сигнал ТРЦ (выводы П2 – П3 трансформатора ПОБС-2) и помехи (выход усилителя *TAVOR 9100*) линейно суммируются и через резистор *R1* подаются на вход приемника ТРЦ.

Работа путевого приемника контролируется регистратором *A17-U8*. Ток во входной цепи измеряется с помощью датчика тока типа *TSP A300 AC/DC Current Probe* (на схеме показано кружочком) и фиксируется регистратором *A17-U8*.

Воздействие помехи зависит от момента ее появления. Чтобы попасть в наиболее неблагоприятный момент времени, файл помехи запускается многократно (10–30 раз).

При испытаниях в нормальном режиме работы РЦ при воздействии помех определяется минимальное значение напряжения АМ сигнала на входе приемника, при котором не происходит сбоев в работе.

При испытаниях в шунтовом режиме работы РЦ при воздействии помех определяется максимальное значение напряжения АМ сигнала на входе приемника, при котором не происходит его срабатывание.

При большом уровне помех, когда при нормировании коэффициент асимметрии составляет менее 0,04, необходимо предварительно обработать записи с использованием математической модели входного фильтра путевого приемника. Применение математической модели полосового фильтра Баттерворта [7] затруднено в связи с необходимостью специальных исследований при выборе параметров.

5 Нормативы по электромагнитной совместимости подвижного состава и рельсовых цепей и методы их проверки

Проверка электромагнитной совместимости электровозов в части мешающего и опасного влияния тягового тока на рельсовые цепи СЦБ и АЛС обычно осуществляется с использованием испытательного комплекса, включающего:

- датчик переменной составляющей тягового тока электровоза;
- устройство регистрации переменной составляющей тягового тока электровоза с преобразованием в цифровой формат данных;
- персональный компьютер для обработки записей цифровых данных переменной составляющей тягового тока электровоза с необходимым набором программных средств.

Набор программных средств испытательного комплекса для обработки зарегистрированных в ходе опытных поездок данных переменной составляющей тягового тока электровоза должен предусматривать возможность гармонического анализа данных методом скользящего окна с перекрытием 50–75 % и использованием «окна Ханна».

Нормы по электромагнитной совместимости ЭПС и рельсовых цепей разработаны для помех, представляющих собой гармонические сигналы синусоидальной формы, эквивалентные сигналам помех в рабочей полосе частот приемников. Предельно допустимое значение синусоидальной помехи в тяговом токе в полосе пропускания приемника по условию мешающего влияния приведено в ГОСТ Р 55176.3.1–2012 [1].

Оценка уровня помех, воздействующих на рельсовые цепи, дается на основе сравнения максимальной величины СКЗ в спектрограмме тягового тока для несущей частоты со значениями, приведенными в [1].

Длительность «окна Ханна» при расчете значения спектрограммы по рассматриваемой гармонике должна соответствовать минимальной длительности помехи, вызывающей сбой нормальной работы приемника. Для ПП1 эта длительность составляет 0,6 секунды.

Аналогичные результаты получены при обработке записей переменной составляющей тягового тока с помощью методики, приведенной в Европейском стандарте [2], посвященном нормам электромагнитной совместимости ЭПС и рельсовых цепей. Стандарт призван решить задачу передвижения высокоскоростного и обычного железнодорожного транспорта в пределах Евросоюза. В связи с тем, что у каждой страны-участницы существуют национальные особенности в системах электроснабжения железных дорог, в частотах питающего тока, в различных конфигурациях и типах РЦ, нормы, предложенные стандартом, не являются общими, а, как раз наоборот, для каждого типа РЦ, для каждого вида тяги (постоянного и переменного (16,7–50 Гц) тока) вводятся определенные уровни допустимых значений гармонических составляющих и методы их оценки. Наиболее часто в стандарте встречается метод вычисления СКЗ

в скользящем окне предварительно отфильтрованного сигнала с указанными параметрами используемого фильтра (тип фильтра, порядок и др.). Таким образом, стандарт регламентирует допустимые нормы и четко указывает требуемый метод обработки записей тягового тока. В стандарте также подчеркивается, что применяемый метод обработки (с четко определенными параметрами: порядок фильтра, тип и длительность окна в ДПФ) должен отражать реальные физические процессы в системе, т. е. не ставится цель как можно точнее обнаружить определенные гармоники тока, а подчеркивается взаимосвязь экспериментальных данных воздействия тягового тока на конкретную РЦ и используемого метода обработки.

В стандарте указаны ограничения на ток ЭПС в зависимости от типа РЦ и методы измерений для определения показателей электромагнитной совместимости электроподвижного состава и рельсовых цепей.

Данные нормы рассчитаны на реальные, наиболее неблагоприятные условия работы РЦ, такие как расчетная асимметрия рельсовой линии в нормальном режиме и обрыв рельсовой нити.

Принимается, что уровень влияния тока электроподвижного состава на рельсовые цепи определяется по максимальному установившемуся сигналу.

Нормы для электроподвижного состава учитывают возможное одновременное влияние нескольких электровозов на рассматриваемую РЦ.

В стандарте указывается, что методы оценки (расчета) электромагнитной совместимости электроподвижного состава и рельсовых цепей должны быть выбраны так, чтобы они отражали работу РЦ.

Стандарт рассматривает приемники рельсовых цепей с амплитудным и частотным детектированием сигнала от генератора.

В набор основных параметров РЦ, которые учитываются при определении электромагнитной совместимости электроподвижного состава и рельсовых цепей, входят:

- рабочие частоты рельсовой цепи и АЛС;
- время срабатывания приемника;
- допустимый мешающий ток (в рабочем диапазоне частот) на входе приемника.

При испытаниях должен записываться общий ток электропоезда.

Одинокое неповторяющееся превышение норм тока электроподвижного состава допускается, если оно вызвано переходными процессами, которые не влияют на работу РЦ. Примерами переходных процессов могут служить броски токов, срабатывание автоматов защиты.

В стандарте рассмотрены все основные типы рельсовых цепей, применяемых на железных дорогах Евросоюза.

В стандарте отмечается серьезная зависимость осциллограмм тягового тока от явлений резонанса в контактной сети и ЭПС, и в связи с тем что это явление зависит от множества факторов, предлагается определять приближенным спо-

собом самую нижнюю резонансную частоту – она должна быть на 20 % меньше рабочей частоты РЦ.

В стандарте рассматриваются два метода обработки записей переменной составляющей тягового тока:

– в частотной области с помощью ДПФ в «окне Ханна» при определенной длительности окна, перекрытие окон (75 или 80 %) – аналогично методу обработки, применяемому на РЖД;

– во временной области: вычисление среднеквадратического значения в окне определенной длительности на выходе полосового фильтра.

Рассмотренные в стандарте методы обработки записей переменной составляющей тягового тока были использованы при анализе экспериментальных результатов, полученных в эксплуатационных условиях на РЖД при движении электропоезда «Сапсан».

Записи переменной составляющей тягового тока целесообразно пересчитать ко входу путевого приемника. Нормативное значение гармоник тягового тока в цепи средней точки дроссель-трансформатора для рельсовых цепей тональной частоты ТРЦЗ составляет 0,35 А. При коэффициенте асимметрии рельсовой линии $K_{ac} = 12\%$ для рельсовых цепей тональной частоты нормативное значение гармонической составляющей тягового тока на входе путевого приемника

$$I_{гпп} = 0,35 \text{ А} \cdot 0,12 \cdot \frac{0,5}{38} = 0,55 \text{ мА}.$$

При максимальном расчетном числе поездов в фидерной зоне и допустимом по ГОСТ Р 55176.3.1–2012 уровне гармоник каждого электровоза 0,35 А значение гармонической составляющей тягового тока на входе путевого приемника в перегонных ТРЦ составляет 0,7 мА. Следовательно, максимальное значение тока помехи $I_{п,макс}(f)$, не приводящее к сбоям в работе приемника в нормальном режиме, при наличии на его входе АМ сигнала с минимальным расчетным уровнем должно быть не менее 0,7 мА.

Работоспособность рельсовой цепи тональной частоты в нормальном режиме оценивается с помощью блок-схемы алгоритма вычислений, приведенной на рис. 8.

В соответствии с представленной блок-схемой рассчитывается СКЗ уровня гармоник в рабочей полосе рельсовых цепей тональной частоты ТРЦЗ в скользящем прямоугольном окне фиксированной длительности 0,6 с предварительно отфильтрованного сигнала с использованием математической модели входного фильтра путевого приемника. Фиксируется максимальная величина СКЗ, обозначенная U , V . Для учета наиболее неблагоприятных условий работы ТРЦ в нормальном режиме значение уровня эквивалентной гармоник, полученное при анализе записи тягового тока, принято считать максимальным в возможном диапазоне разброса результатов измерений.

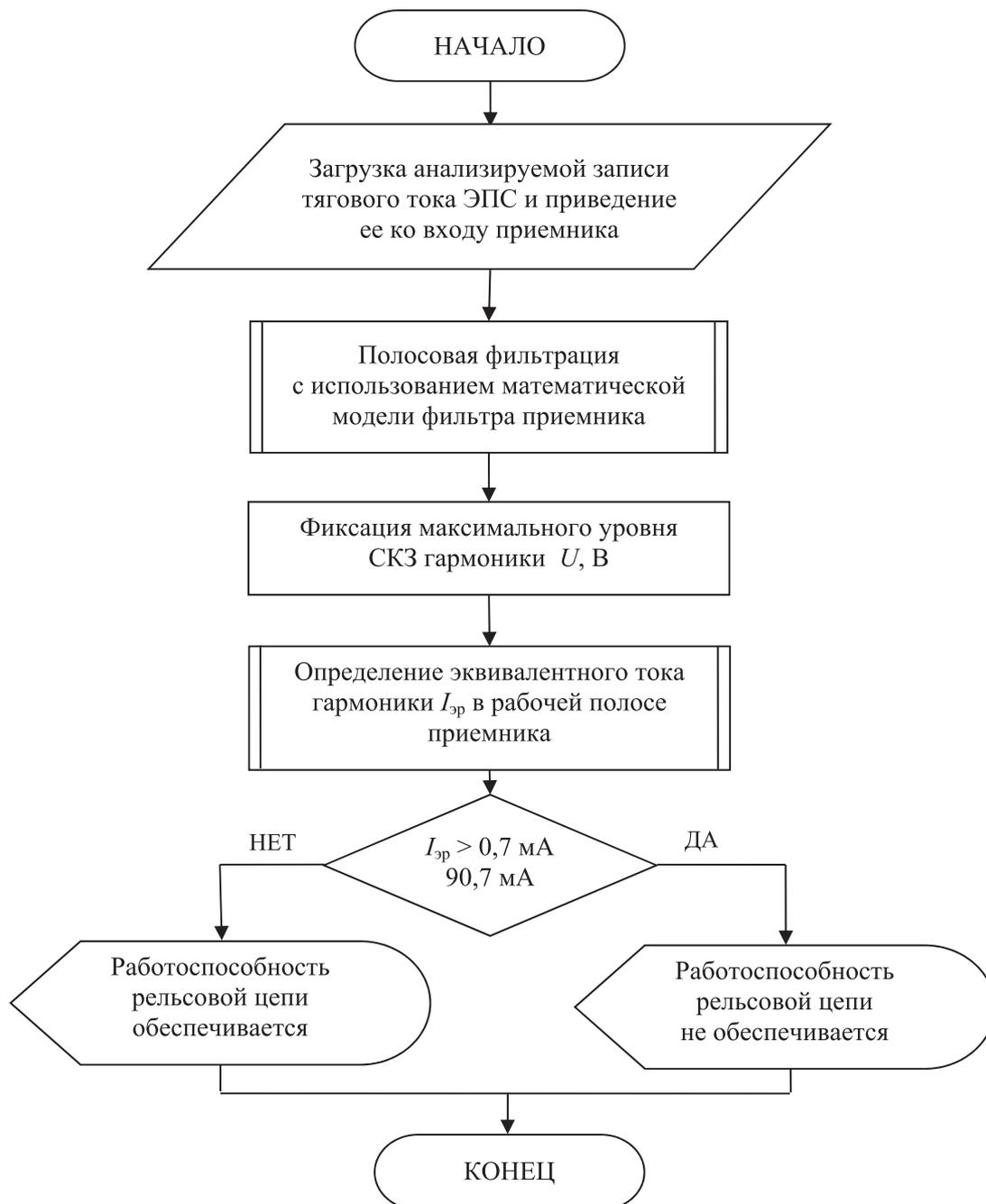


Рис. 8. Блок-схема алгоритма оценки работоспособности РЦ тональной частоты в нормальном режиме при воздействии гармоник тягового тока

В соответствии с блок-схемой алгоритма, показанной на рис. 8, произведена обработка записей тягового тока электропоезда «Сапсан» с целью оценки работоспособности рельсовых цепей тональной частоты. Загруженные данные по анализируемой записи тягового тока приведены ко входу приемника с учетом коэффициентов асимметрии и снижения тока в конце рельсовой линии для нормального режима работы. Расчетный коэффициент асимметрии K_{ac} для тяги

постоянного тока составляет 0,12. Далее произведена полосовая фильтрация с использованием математической модели фильтра путевого приемника. Сравнение расчетного значения эквивалентного тока гармоник в рабочей полосе приемника с пороговым значением 0,7 мА показывает, что работоспособность РЦ обеспечивается.

Нарушений работоспособности рельсовых цепей тональной частоты при измерениях и регистрации тока электропоезда «Сапсан» на Октябрьской железной дороге не обнаружено.

Заключение

По результатам исследования можно отметить следующее.

1. Доля гармоник тягового тока электровоза, оказывающая мешающее влияние на аппаратуру генерации и приёма сигнала рельсовых цепей характеризуется коэффициентом влияния $K_{вл}$. Получены расчётные выражения $K_{вл}$ для различных эксплуатационных условий.

2. Разработан алгоритм синтеза рельсовой цепи с учетом условий обеспечения контрольного режима и зависимости критических характеристик от воздействия гармоник тягового тока на путевого приёмник рельсовой цепи.

3. Разработана методика экспериментальной оценки воздействия помех тягового тока на работу путевого приёмника с помощью физического моделирования.

4. Параметры спектральной обработки записей переменной составляющей тягового тока, применяемые на РЖД и рекомендуемые Европейском стандартом, посвященным нормам электромагнитной совместимости ЭПС и рельсовых цепей, аналогичны. Максимальные уровни синусоидальных сигналов, нарушающих работу рельсовых цепей, определяются как составляющие ДПФ СКЗ одиночной гармоник в «окне Ханна» с перекрытием 75 % и длительностью, соответствующей минимальной длительности помехи, вызывающей сбой нормальной работы приёмника.

5. При обработке записей во временной области рекомендуется использовать математическую модель фильтра Баттерворта, АФЧХ которого аналогична АФЧХ входного фильтра путевого приёмника. При этом необходимо рассчитывать СКЗ уровня гармоник в рабочей полосе рельсовых цепей в скользящем прямоугольном окне длительностью, соответствующей минимальной длительности помехи, вызывающей сбой нормальной работы путевого приёмника.

6. Результаты обработки записей тягового тока и экспериментальные исследования в эксплуатационных условиях подтверждают вывод о работоспособности рельсовых цепей тональной частоты при воздействии тока электропоезда «Сапсан».

Библиографический список

1. ГОСТ Р 55176.3.1–2012 (МЭК 62236-3-1:2008). Совместимость технических средств электромагнитная. Системы и оборудование железнодорожного транспорта. Ч. 3–1. Подвижной состав. Требования и методы испытаний. – Введ. 2014-01-01. – Москва : Стандартинформ, 2014. – 28 с.
2. CENELEC DS/CLC/TS 50238-2:2010. Railway Applications – Compatibility Between Rolling Stock And Train Detection Systems – Part 2: Compatibility With Track Circuits, 01.07.2010, 42 p.
3. Кравцов Ю. А. Расчет влияния тягового тока на тональные рельсовые цепи без изолирующих стыков / Ю. А. Кравцов, Е. Г. Щербина, П. Е. Мащенко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2007. – № 2. – С. 47–57.
4. Кравцов Ю. А. Исследование помехоустойчивости путевых приемников тональных рельсовых цепей / Ю. А. Кравцов, В. И. Линьков, П. Е. Мащенко, А. Е. Щербина // Наука и техника транспорта. – 2009. – № 1. – С. 86–91.
5. Брылеев А. М. Теория, устройство и работа рельсовых цепей / А. М. Брылеев, Ю. А. Кравцов, А. В. Шишляков. – Москва : Транспорт, 1978. – 344 с.
6. Кравцов Ю. А. Методика расчета контрольного режима рельсовой цепи с учетом воздействия тока электроподвижного состава с асинхронным тяговым приводом / Ю. А. Кравцов, Е. В. Архипов, А. Б. Чегуров, М. Е. Бакин // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2013. – № 1. – С. 108–115.
7. Бестемьянов П. Ф. Методика оценки работоспособности рельсовых цепей тональной частоты при воздействии тока электроподвижного состава с асинхронным тяговым приводом / П. Ф. Бестемьянов, Ю. А. Кравцов, Е. Г. Щербина, А. Б. Чегуров // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2012. – № 1. – С. 87–92.

*Статья представлена к публикации членом редколлегии И. М. Кокуриным
Поступила в редакцию 14.01.2015
Контактная информация: kgs1@mail.ru*

© Кравцов Ю. А., 2015