

ционной надежности мостов : межвуз. сб. научн. трудов. – Днепропетровск : Транспорт, 1988. – С. 167–173.

2. **Учет** взаимодействия сооружения с грунтом при расчете металлических пролетных строений мостов на вертикальные сейсмические воздей-

ствия / А. М. Уздин, В. В. Кондратов // Сейсмостойкое строительство : научно-техн. реф. сб. – Сер. 14, вып. 4. – М. : ЦИНИС, 1982. – С. 18–23.

3. **Вибрации** в технике : справочник. Т. 1. Колебания линейных систем. – М. : Машиностроение, 1978. – 352 с.

УДК 656.254.16:656.21

Ю. А. Кравцов, Е. В. Архипов

Московский государственный университет путей сообщения

А. Б. Чегуров

ЗАО «Нейроком»

М. Е. Бакин

Московский государственный университет путей сообщения

МЕТОДИКА РАСЧЁТА КОНТРОЛЬНОГО РЕЖИМА РЕЛЬСОВОЙ ЦЕПИ С УЧЁТОМ ВОЗДЕЙСТВИЯ ТОКА ЭЛЕКТРОПОДВИЖНОГО СОСТАВА С АСИНХРОННЫМ ТЯГОВЫМ ПРИВОДОМ

Для рабочей полосы путевого приёмника получено выражение, по которому производится расчёт тока гармоники, приводящей к замыканию контактов исполнительного реле. Приведены блок-схемы алгоритмов определения критических характеристик контрольного режима и расчёта допустимого уровня гармоники тягового тока электроподвижного состава с асинхронным тяговым приводом.

тяговый электропривод, рабочая полоса частот, путевого приёмник, сигнал, путевого генератор, гармоника тягового тока, коэффициент влияния, обрыв рельсовой нити, сбой, полином, контактный провод.

Введение

Эксплуатируемые на российских железных дорогах рельсовые цепи разработаны в то время, когда на электроподвижном составе применялся тяговый привод с коллекторным двигателем постоянного тока [1]. При этом все гармоники тягового тока были кратны 50 Гц. Рабочие полосы частот путевых приёмников защищены от воздействия гармоник тягового тока с помощью фильтров. Поэтому критерии обеспечения нормального, шунто-

вого и контрольного режимов работы рельсовых цепей разработаны при условии, что на входе путевых приёмников в рабочей полосе частот действует только полезный сигнал.

В настоящее время прослеживается тенденция применения на тяговом подвижном составе асинхронного двигателя при электроснабжении как на постоянном токе, так и на переменном [2]. Поскольку регулирование тяги осуществляется путем изменения частоты тока, потребляемого асинхронным двигателем, гармоники тока электровоза воз-

никают в очень широком диапазоне частот, в том числе и в том, в котором работают рельсовые цепи.

Для обеспечения работоспособности автоблокировки и автоматической локомотивной сигнализации нормируются допустимые уровни гармоник тягового тока в рабочей полосе [3]. Разработаны технические решения по обеспечению электромагнитной совместимости электроподвижного состава и устройств интервального регулирования движения поездов по требованиям безопасности [4]. Известны методы расчёта уровня гармоник тягового тока в рабочей полосе путевых приёмников в несимметричной рельсовой цепи в нормальном режиме [1], [5].

Экспериментальная проверка условий работоспособности рельсовых цепей проводится на основе обработки записей тягового тока и сравнения полученных результатов с нормируемым значением. На современном этапе при анализе записей тока электровоза его составляющие на частотах рельсовых цепей представляют в виде простых гармоник. Они чаще всего определяются двумя способами: как реакция длительностью не менее 0,3 с полосового фильтра и как составляющая в математической аппроксимации сигнала тягового тока рядами Фурье при эффективной длительности окна не менее 0,3 с с учётом перекрытия окон [4].

В настоящее время неизвестны данные об экспериментальном подтверждении соответствия результатов обработки записей тока ЭПС указанными выше способами фактическим значениям в рабочей полосе путевых приёмников максимальных уровней эквивалентных синусоидальных сигналов, нарушающих работу устройств интервального регулирования. В связи с этим разработана методика обработки записей тягового тока, позволяющая оценивать работоспособность рельсовой цепи с учётом фактической помехоустойчивости путевых приёмников [6], [7].

Математическое моделирование, описывающее влияние тягового тока на симметричные рельсовые цепи при работе в контрольном режиме, отсутствует. Поэтому необходи-

мо разработать методику расчета рельсовой цепи в контрольном режиме для возможных значений первичных параметров рельсовой линии и различных мест обрыва с учётом того, что на входе путевых приёмников в рабочей полосе частот действуют одновременно и полезный сигнал, и гармоника тока электроподвижного состава.

1 Методика расчёта уровня гармоник тягового тока в полосе пропускания путевого приёмника рельсовой цепи с изолирующими стыками в контрольном режиме

При анализе работы рельсовых цепей с учетом воздействия тягового тока и его гармонических составляющих используются уравнения распространения напряжений и токов в рельсовой линии с учетом взаимной индуктивности контактного провода и рельсов. При этом приведённое в [1] решение системы дифференциальных уравнений для токов и напряжений рельсовой линии с учётом первичных параметров и коэффициентов распространения волн земляного и фазового тракта имеет следующий вид:

$$U_{1x} = A_1 ch\gamma_1 x + A_2 sh\gamma_1 x + A_3 ch\gamma_2 x + A_4 sh\gamma_2 x;$$

$$U_{2x} = M(A_1 ch\gamma_1 x + A_2 sh\gamma_1 x) + N(A_3 ch\gamma_2 x + A_4 sh\gamma_2 x);$$

$$I_{1x} = y_{11}(A_1 sh\gamma_1 x + A_2 ch\gamma_1 x) + y_{12}(A_3 sh\gamma_2 x + A_4 ch\gamma_2 x) + I_k \frac{Z_{\text{МКР}}}{Z_1 + Z_M};$$

$$I_{2x} = y_{21}(A_1 sh\gamma_1 x + A_2 ch\gamma_1 x) + y_{22}(A_3 sh\gamma_2 x + A_4 sh\gamma_2 x) + I_k \frac{Z_{\text{МКР}}}{Z_1 + Z_M},$$

где I_{1x} , I_{2x} – токи в первой и второй рельсовых нитях с положительным направлением от питающего конца к нагрузке; U_{1x} , U_{2x} – напряжения первой и второй рельсовых нитей относительно земли с положительным направлением от рельсов к земле; I_k – ток, протекаю-

щий в контактном проводе с положительным направлением от тяговой подстанции.

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 рисунке 1.

На схеме рисунка 1 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; $R_{з.т.п}$ – сопротивление заземляющего контура тяговой подстанции.

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

при $x = l_1$

$$I_k - I_{нвх} - I_{1н}^{\circ} - I_{2н}^{\circ} = 0;$$

$$I_{1н}^{\circ} - I_{н1} - I'_{2н} = 0;$$

$$I_{2н}^{\circ} - I_{н1} - I'_{2н} = 0;$$

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

$$\frac{U'_{1н} + U'_{2н}}{2Z'_{вх1}} + I'_{1н} + I'_{2н} = I_k;$$

при $x = 0$

$$I'_{1к} = 0;$$

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

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

$$I''_{1н} = 0;$$

при $x = -l_2$

$$I''_{1к} - I_{н2} - I_{1н}^* = 0;$$

$$I''_{2к} - I_{н2} - I_{2н}^* = 0;$$

$$I''_{1к} - I''_{2к} - 2 \frac{U''_{1к} - U''_{2к}}{Z_{н2}} = 0;$$

$$I''_{1к} + I''_{2к} - \frac{U''_{1к} + U''_{2к}}{2Z_{вхэ}} = I_k;$$

$$Z_{вхэ} = R_{з.т.п} \parallel Z_{вх2}.$$

На основании приведённых граничных условий находятся постоянные интегриро-

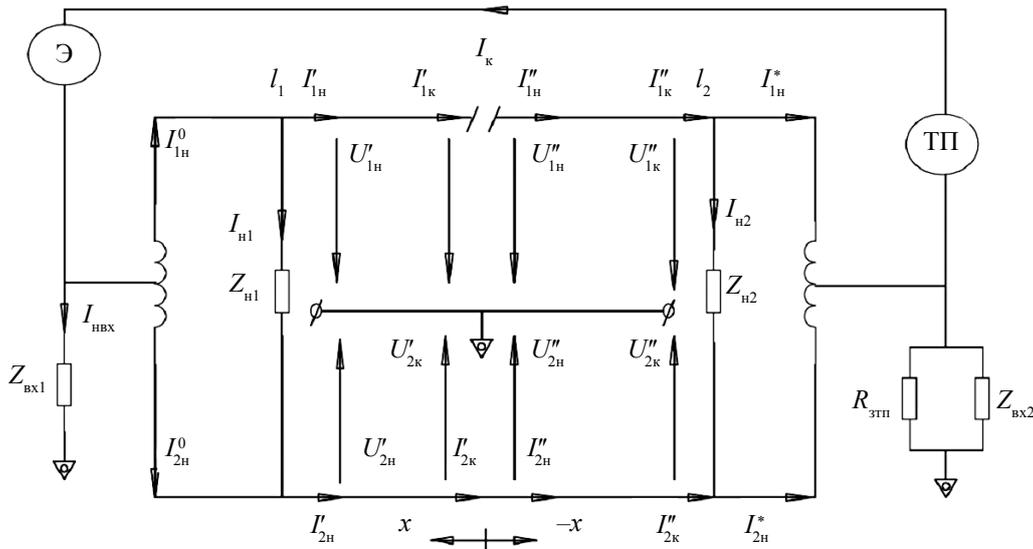


Рис. 1. Схема замещения рельсовой цепи с изолирующими стыками, примыкающей к отсосу тяговой подстанции

вания $A'_1, A'_2, A'_3, A'_4, A''_1, A''_2, A''_3, A''_4$, что в дальнейшем позволяет определить любой ток или напряжение в цепи в зависимости от тока в контактном проводе.

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

при $x = l_1$

$$I_{н1} = \frac{U'_{1н} - U'_{2н}}{Z_{н1}};$$

$$I_{н1} = \frac{2}{Z_{н1}} [A'_3 ch(\gamma_2 L_1) + A'_4 sh(\gamma_2 L_1)];$$

при $x = -l_2$

$$I_{н2} = \frac{U''_{1к} - U''_{2к}}{Z_{н2}};$$

$$I_{н2} = \frac{2}{Z_{н2}} [A''_3 ch(\gamma_2 (L_3 - L_1)) - A''_4 sh(\gamma_2 (L_3 - L_1))].$$

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

$$K_{вл1} = \left| \frac{I_{н1}}{I_k} \right|; \quad K_{вл2} = \left| \frac{I_{н2}}{I_k} \right|. \quad (1)$$

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

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

В связи с внедрением современных типов тяговых электроприводов в рабочей полосе частот путевого приемника могут одновре-

менно присутствовать сигнал от путевого генератора и гармоники тягового тока.

При заданных типе, частоте f и длине L рельсовой цепи коэффициент влияния, как следует из рисунка 1, является функцией двух аргументов: сопротивления изоляции $R_{из}$ и расстояния L_o до места обрыва рельсовой линии, $K_{вл}(R_{из}, L_o)$.

Ток на входе приемника от путевого генератора при оборванной рельсовой линии также является функцией этих же двух аргументов при фиксированных типе, частоте и длине РЦ $I_{н.о.р}(R_{из}, L_o)$ [1].

Для путевых приемников типа ПП1 рельсовых цепей тональной частоты экспериментально получена зависимость (рис. 2) тока гармоники на входе приемника $I_{н.г}$, частотой, совпадающей с несущей амплитудно-манипулированного сигнала от ГП, приводящей к замыканию контактов исполнительного реле, от величины остаточного входного тока $I_{н.о.р}$ от путевого генератора при работе рельсовой цепи в контрольном режиме.

Представленные экспериментальные данные можно аппроксимировать полиномом первой степени и получить следующую аналитическую зависимость, где значения токов, мА:

$$I_{н.г} = -1,485 \cdot I_{н.о.р} + 3,509. \quad (2)$$

На основании выражения (2) формула для расчета критерия чувствительности рельсовой цепи к обрыву рельсовой нити $K_{о.р.ап}$ с учетом воздействия тока электроподвижного состава с асинхронным тяговым приводом примет вид:

$$K_{о.р.ап} = \frac{K_{в}(-1,485 \cdot I_{н.о.р} + 3,509) \cdot |K_{тк}|}{1000 \cdot |K_{вл}| \cdot I_k}, \quad (3)$$

где $K_{в}$ – коэффициент возврата приемника; $K_{тк}$ – коэффициент снижения тока при передаче сигнала через устройства согласования в конце рельсовой линии [1]; $I_{н.г}$ на входе приемника типа ПП1, приводящей к сбою в контрольном режиме РЦ, от величины остаточного входного тока $I_{н.о.р}$; $K_{вл}$ – коэффициент влияния, определяемый по формулам (1);

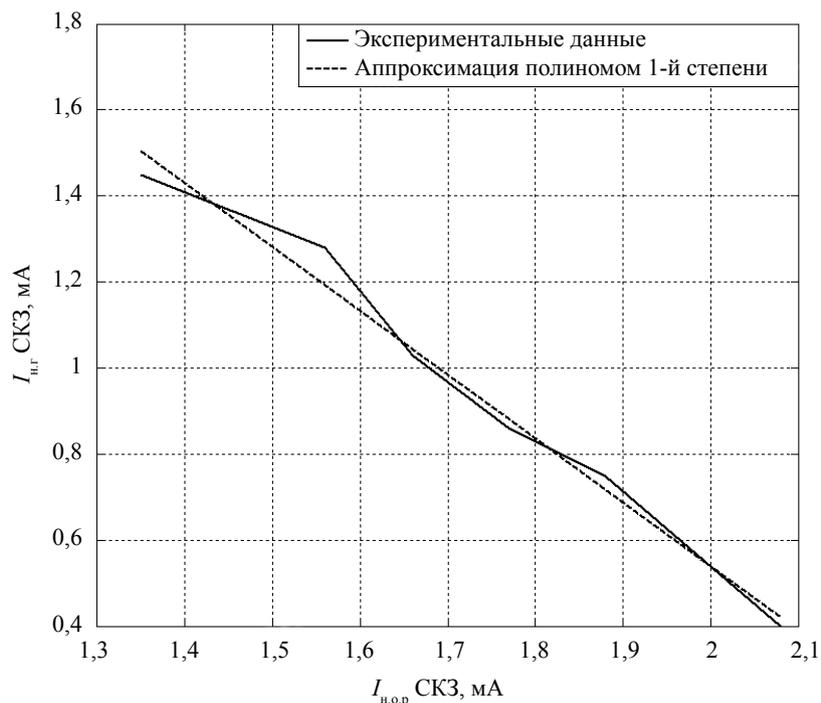


Рис. 2. Зависимость минимального уровня гармоник тягового тока

I_{κ} – ток гармоник в контактном проводе СКЗ, А.

Ток $I_{\text{н.о.р}}$ может быть выражен следующим образом: $I_{\text{н.о.р}} = \frac{E_{\text{эмакс}}}{|Z_{\text{пок}}|}$,

$$E_{\text{эмакс}} = 0,001 \cdot I_{\text{р}} \cdot K_3 \cdot |K_{\text{тк}}| \cdot K_u \cdot |Z_{\text{по}}|, \quad (4)$$

где $Z_{\text{по}}$, $Z_{\text{пок}}$ – приведенные сопротивления передачи основной схемы замещения рельсовой цепи в нормальном и контрольном режимах; $I_{\text{р}}$ – ток срабатывания приемника, мА; K_3 – коэффициент запаса; K_u – коэффициент колебаний напряжения на выходе путевого генератора в зависимости от напряжения питающей сети $\left(K_u = \frac{U_{\text{макс}}}{U_{\text{мин}}} \right)$.

С учетом (4) получим:

$$K_{\text{о.р.ап}} = \frac{K_{\text{в}}(3,509|K_{\text{тк}}| \cdot |Z_{\text{пок}}| - 1,485 \cdot 10^{-3} \cdot I_{\text{р}} \cdot K_3 \cdot |K_{\text{тк}}|^2 \cdot K_u \cdot |Z_{\text{по}}|)}{1000 \cdot |K_{\text{вл}}| \cdot |Z_{\text{пок}}| \cdot I_{\kappa}}. \quad (5)$$

При расчёте контрольного режима определение критического места обрыва и критического сопротивления изоляции необходимо проводить 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 гармоник электроподвижного состава с частотой, совпадающей с несущей амплитудно-манипулированного сигнала контроля рельсовой цепи, приведена на рисунке 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 $K_{\text{о.р.ап1}}^*(R_{\text{из1}}^*, L_{o1}^*)$ в зависимости от сопротивления изоляции. После определения $K_{\text{о.р.ап1}}^*(R_{\text{из1}}^*, L_{o1}^*)$ аналогично рассчитывается $K_{\text{о.р.ап2}}^*(R_{\text{из2}}^*, L_{o2}^*)$ при следующем значении расстояния до места обрыва.

Из полученного множества значений $K_{\text{о.р.ап}}^*(R_{\text{из1}}^*, L_{o1}^*)$ выбирается минимальное, при этом $(R_{\text{из1}}^*, L_{o1}^*)$ 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.

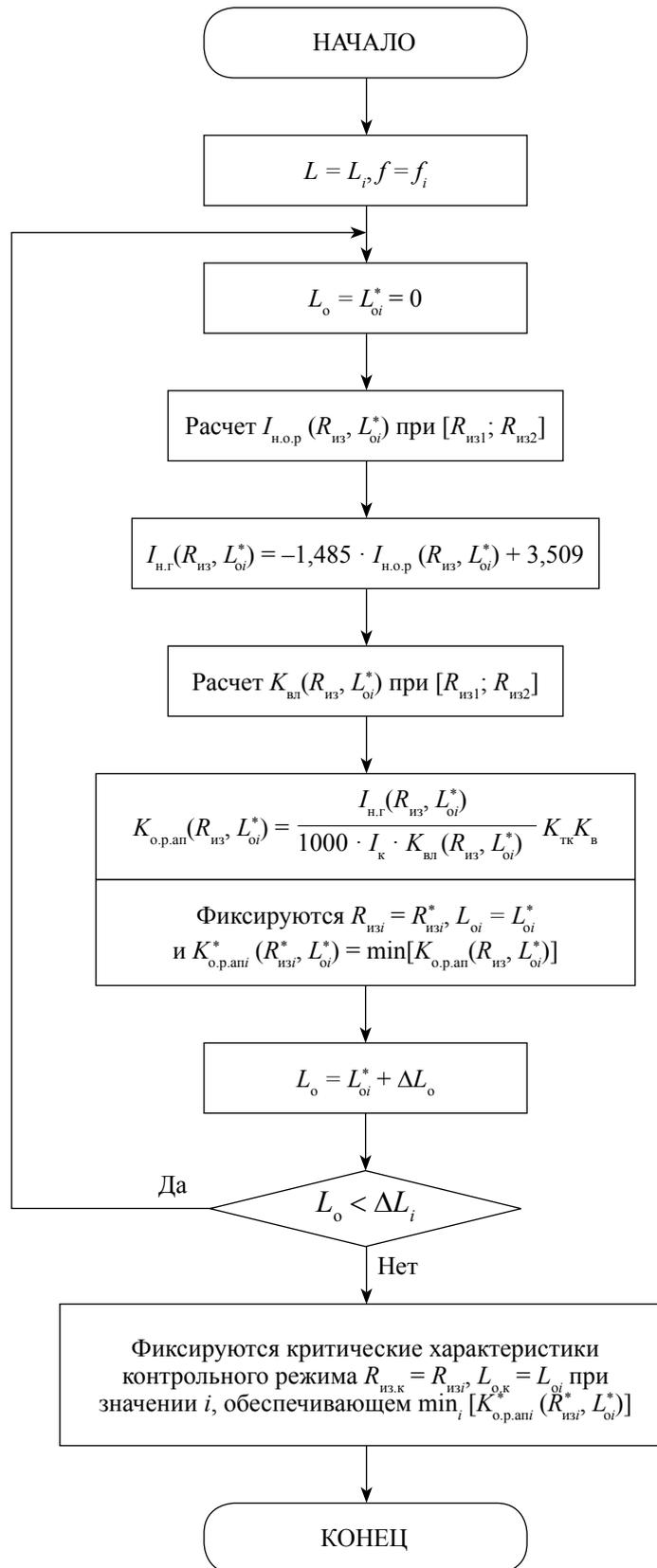


Рис. 3. Блок-схема алгоритма определения критических характеристик контрольного режима

Блок-схема алгоритма расчёта допустимого уровня гармоник тягового тока на фиксированной частоте при заданной длине рельсовой цепи приведена на рисунке 4. В этом случае задаются различными значениями тока гармоник I_k . Для каждого значения определяют $K_{o.p.ap}$ при критических месте обрыва и сопротивлении изоляции, которые считаются известными в результате выполнения алгоритма по блок-схеме рисунка 3. Значение I_k , при котором $K_{o.p.ap} = 1$, является максимально допустимым.

Библиографический список

1. **Теория**, устройство и работа рельсовых цепей / А. М. Брылеев, Ю. А. Кравцов, А. В. Шишляков. – М. : Транспорт, 1978. – 344 с.

2. **Обеспечение** электромагнитной совместимости электроподвижного состава постоянного тока нового поколения с устройствами железнодорожной автоматики в условиях польских железных дорог : автореф. дис. ... канд. техн. наук / А. Бялонь. – М., 2001. – 30 с.

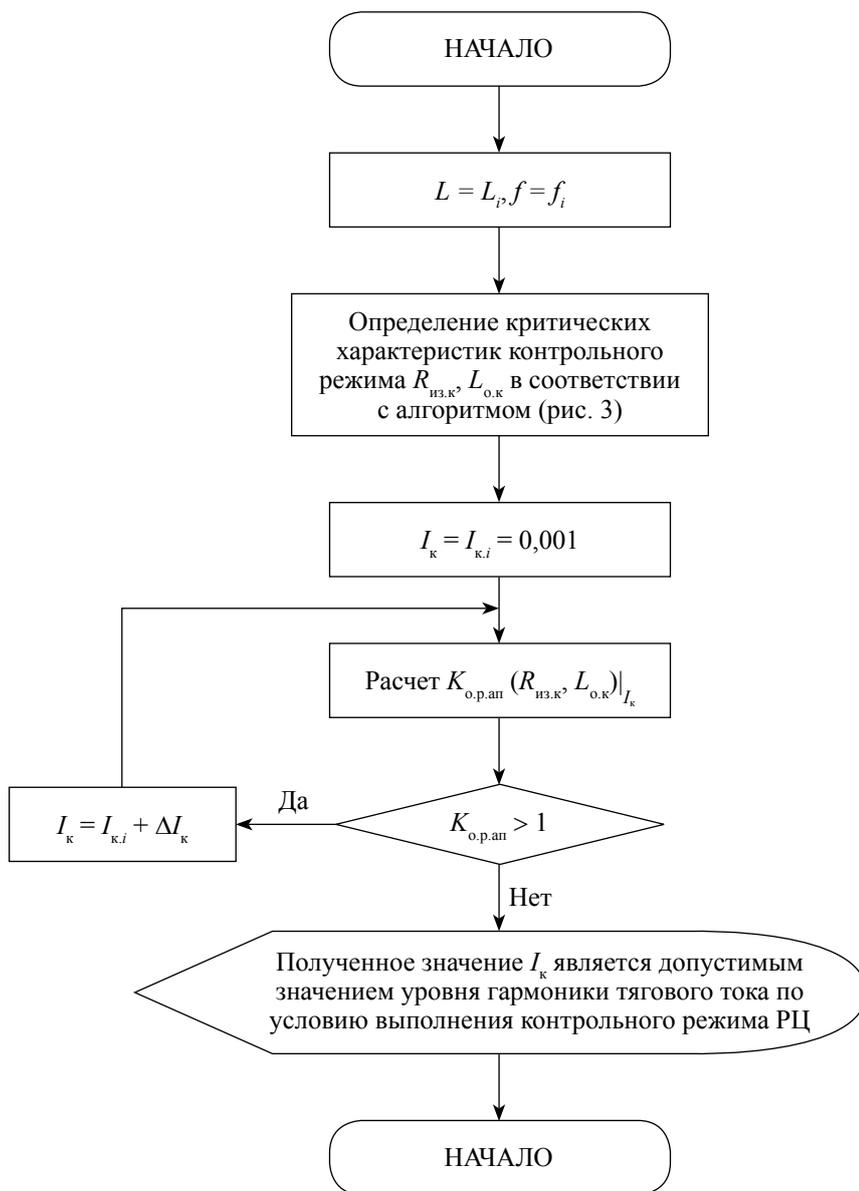


Рис. 4. Блок-схема алгоритма расчёта допустимого уровня гармоник тягового тока

3. **Нормы** безопасности на железнодорожном транспорте. НБ ЖТ ЦТ 04–98. Электровозы. Требования по сертификации. Введ. 07.08.98. – М., 2003. – 172 с.

4. **Обеспечение** электромагнитной совместимости электроподвижного состава и устройств интервального регулирования движения поездов по требованиям безопасности / Ю. А. Кравцов, В. С. Антоненко, В. М. Сафро, Е. Г. Щербина, А. А. Антонов // Вестник МИИТа. – Вып. 10. – М. : МИИТ, 2004. – С. 27–30.

5. **Расчёт** влияния тягового тока на тональные рельсовые цепи без изолирующих стыков /

Ю. А. Кравцов, Е. Г. Щербина, П. Е. Машенко // Вестник РГУПС. – 2007. – № 2. – С. 47–57.

6. **Исследование** помехоустойчивости путевых приёмников тональных рельсовых цепей / Ю. А. Кравцов, В. И. Линьков, П. Е. Машенко, А. Е. Щербина // Наука и техника транспорта. – 2009. – № 1. – С. 86–91.

7. **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 РГУПС. – 2012. – № 1. – С. 87–92.

УДК 629.4.023

В. А. Кручек, Х. Р. Косимов

Петербургский государственный университет путей сообщения

ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА РАМ ЛОКОМОТИВОВ И ПРОДЛЕНИЕ ИХ СРОКОВ СЛУЖБЫ

Безопасная эксплуатация транспортного средства определяется остаточной прочностью деталей, узлов и конструкций. Статья посвящена моделированию и анализу напряженно-деформированного состояния рамы тепловоза. Рассмотрены оценка остаточного ресурса и продление сроков службы рам локомотивов.

подвижной состав, рама тепловоза, срок службы, несущие конструкции, прочность.

Введение

В связи с увеличением скоростей движения на железнодорожном транспорте и веса поездов (грузонапряженности) возрастают нагрузки на элементы экипажной части локомотивов, в том числе на рамы тепловозов. Структура элементов металлоконструкции механической части железнодорожного подвижного состава представляет собой ряд сложных пространственных конструкций с большим количеством разнообразных по конфигурации соединений и концентраторов напряжений, воспринимающих широкий спектр эксплуатационных нагрузок. Их размеры и форма определяются усилиями, де-

формациями и напряжениями в них, а также другими характеристиками состояния, которые формируются под действием нагрузок различного вида и характера, определяемых параметрами, назначением и условиями эксплуатации подвижного состава. В зависимости от этих показателей данные элементы рассчитываются на прочность и жесткость при статических и динамических нагрузках. Необходимые несущая способность и надежность конструкции должны обеспечиваться при возможно меньшей массе.

Для решения задач ресурсосбережения и сокращения эксплуатационных расходов на железнодорожном транспорте требуется повышение прочности и надежности конструк-