



# Анализ электромагнитной совместимости рельсовых цепей и тягового электроснабжения



Юрий ЗЕНКОВИЧ  
Yuri I. ZENKOVICH

Александр ИВАНЕНКО  
Alexander A. IVANENKO



## Analysis of Electromagnetic Compatibility of Track Circuits and Traction Power Supply

(текст статьи на англ. яз. – English text of the article – p. 44)

**Рассмотрены вопросы электромагнитной совместимости устройств тягового электроснабжения с рельсовыми цепями при гололёдных явлениях на контактном проводе. Приводятся расчетные соотношения для определения значения токов подмагничивания дроссель-трансформаторов при электрической дуге, возникающей вследствие образования наледи на контактном проводе, а также анализируются причины ложной занятости рельсовых цепей на станции.**

**Ключевые слова:** электромагнитная совместимость, ложная занятость, рельсовая цепь, электрическая дуга, коэффициент асимметрии, тяговый ток, контактный провод, удельное сопротивление рельсов.

*Зенкович Юрий Иосифович – заслуженный изобретатель России, кандидат технических наук, доцент Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ), Москва, Россия.*

*Иваненко Александр Александрович – начальник технического отдела департамента безопасности движения ОАО «РЖД», Москва, Россия.*

**Н**а участках железных дорог при электротяге переменного тока наблюдаются случаи ложной занятости рельсовых цепей при обледенении контактного провода. Как правило, они имеют место на станциях и очень редко на перегонах.

Ложная занятость наступает из-за воздействия тягового тока на аппаратуру рельсовых цепей и проявляется при приближении поезда к входному сигналу станции, когда внезапно разрешающий сигнал входного светофора перекрывается на запрещающее показание перед вступлением поезда на установленный для него маршрут движения по станции. В результате этого машинист может проехать запрещающее показание входного светофора, что квалифицируется как нарушение правил безопасности движения и эксплуатации железнодорожного транспорта.

Проведём подробный анализ причин возникновения таких сбоев в работе устройств СЦБ в период гололёдных явлений на контактном проводе. На рис. 1 представлена схема тягового электроснабжения электроваза, включающая в себя тяговую подстанцию ТП, рельсовые цепи 1РЦ-3РЦ с дроссель-трансформаторами ДТ, к вторичным обмоткам которых подключается аппаратура

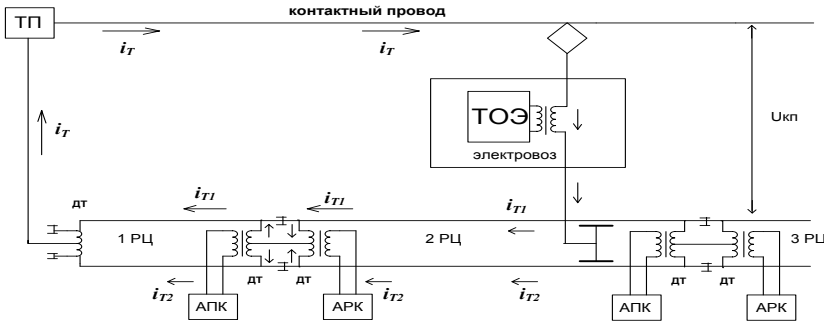


Рис. 1.

питающего конца АПК рельсовой цепи и аппаратура релейного конца АПК. На рис. 1 показаны также схема токоёма электровоза с тяговым оборудованием электровоза (ТОЭ) и тяговые токи  $i_T, i_{T1}, i_{T2}$ , протекающие через контактный провод и по рельсам, причём  $i_T = i_{T1} + i_{T2}$ .

При образовании наледи на контактном проводе между лыжей пантографа электровоза и контактным проводом возникает электрическая дуга [1]. Для анализа условий возникновения дуги может быть использована электрическая схема замещения тягового электроснабжения электровоза в виде, представленном на рис. 2, где  $L$  — эквивалентная индуктивность трансформатора тяговой подстанции ТП и трансформатора электровоза. Сопротивление контактного провода и рельсов обратной тяговой сети можно считать активной величиной  $r$ , так как их индуктивность во много раз меньше величины  $L$ . Переключателем П будет имитироваться процесс вступления электровоза на участок с наледью на контактном проводе и, следовательно, переходный процесс, вызывающий зажигание электрической дуги, напряжение на которой обозначено  $U$ .

На рис. 3 показана приближенная кусочно-линейная аппроксимация характеристики электрической дуги. До тех пор, пока напряжение между графитовой вставкой полоза токоприемника электровоза и контактным проводом не достигнет величины  $U_1$ , дуга не горит и электрическая цепь при включённом рубильнике П (рис. 2) разорвана. При повышении напряжения на дуге до значения  $U_1$  дуга зажигается и на ней устанавливается напряжение  $U_2$ . Снижение напряжения со значения  $U_1$  до  $U_2$  происходит не мгновенно, однако при низкой частоте источника  $U_{кп}$ , равной 50 Гц, и при упрощённом рассмотрении задачи без учёта инерционности дуги можно этим временем пренебречь и считать,

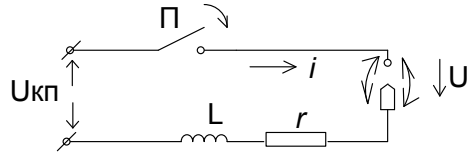


Рис. 2.

что сразу после зажигания дуги на ней устанавливается напряжение  $U_2$ . Напряжение на дуге  $U_2$  остаётся неизменным, вплоть до момента, когда ток в цепи проходит через нуль и дуга гаснет. Если за начало отсчёта времени выбрать момент зажигания дуги, то переходный процесс в электрической цепи схемы (рис. 2) будет характеризоваться следующими параметрами:

$$U_{кп} = U_m \cdot \sin(\omega t + \alpha_n) - U_2, \quad (1)$$

$$\text{где } \alpha_n = \arcsin\left(\frac{U_1}{U_m}\right).$$

В этом случае ток переходного процесса для  $i > 0$  может быть представлен в виде:

$$i = \frac{U_m}{z} \cdot \left[ \frac{\sin(\omega t + \alpha_n - \phi) - \frac{U_2}{U_1} \sin(\alpha_n - \phi)}{e^{-\frac{t}{\tau}}} \right] - \frac{U_2}{r} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}), \quad (2)$$

$$\text{где } \phi = \arctg(\omega L/r), \quad z = \sqrt{(\omega L)^2 + r^2}, \quad \tau = L/r.$$

На рис. 4 представлены графики зависимости напряжения  $U_{кп}$  и тока  $i$ , а также напряжения на дуге  $U = \pm U_2$ . Как видно из графика, установившийся режим тока  $i$  в интервале времени от 0 до 1 определяется изменяющимся во времени напряжением  $U_{кп}$ , которое не достигает значения  $U_1$  и описывается уравнением (2). Интервалы погасания дуги между токами 1–2 и 3–4 зависят от параметров электрической цепи и могут быть сведены к нулю, то есть электрическая дуга может гореть непрерывно. Условием непрерывного горения в этом случае является соотношение между напряжениями в точке 1 (рис. 4) когда  $U_3 \geq U_1$ , что, в свою очередь, зависит от амплитуд-



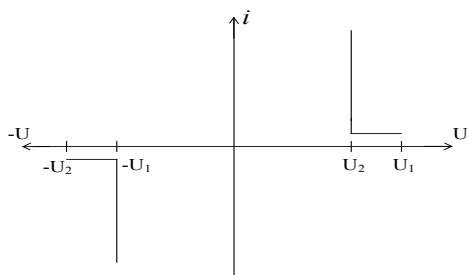


Рис. 3.

ного значения  $U_m$  на контактном проводе и индуктивности  $L$ .

При достаточно больших значениях  $L$  и  $U_m$  дуга может гореть непрерывно. Рассмотрим условия, при которых это будет происходить.

Если при  $i = 0$  напряжение  $U = |U_3| \geq |-U_1|$ , то дуга горит без перерывов, а точки 1 и 2, 3 и 4 соответственно сливаются в одну. В этом случае установившийся режим наступит, когда угол  $\alpha_n$  изменится и примет некоторое наибольшее значение  $\alpha_m$ .

Напряжение источника, при котором изменяется полярность тока дуги, также увеличится до некоторого значения  $U > |-U_1|$ .

Величина  $\alpha_m$  может быть определена из условия, что время между моментами зажигания дуги и прохождения тока через нуль равно половине периода  $\pi$ . В этом случае будем иметь:

$$\frac{U_m}{z} \left[ \frac{\sin(\alpha_m - \varphi + \pi) - e^{-\frac{\pi}{\omega \cdot \tau}} \sin(\alpha_m - \varphi)}{e^{\frac{\pi}{\omega \cdot \tau}} \sin(\alpha_m - \varphi)} \right] - \frac{U_2}{r} (1 - e^{-\frac{\pi}{\omega \cdot \tau}}) = 0, \quad (3)$$

откуда:

$$\alpha_m = \varphi - \arcsin \left( \frac{U_2 \cdot z \cdot (1 - e^{-\frac{\pi}{\omega \cdot \tau}})}{U_m \cdot r \cdot (1 + e^{-\frac{\pi}{\omega \cdot \tau}})} \right). \quad (4)$$

При существующих значениях индуктивности  $L$  и напряжения контактной сети тягового электроснабжения дуга горит непрерывно. Однако процесс непрерывного горения не может вызывать сбои в работе устройств СЦБ, так как ток  $i$  не содержит постоянной

составляющей, а от высших гармонических составляющих этого тока имеется достаточно надёжная защита, основанная на применении синхронных фазочувствительных приёмников типа ДСШ [2], в которых путевые и местные цепи питаются от разных и независимых источников питания.

В то же время следует отметить, что электрическая дуга сопровождается мощным тепловым процессом, который выбрасывает в окружающую среду огромное количество тепла. Выделяемая электрическая мощность в среднем составляет от 50 до 100 кВА. Такая энергия способна мгновенно расплавить лёд в окрестности полоза токоприёмника и восстановить контакт в системе электроснабжения электровоза, то есть погасить электрическую дугу. После погасания дуги и остывания элементов токоёма электровоза при его непрерывном движении происходит снова наезд на налесь контактного провода и зажигание электрической дуги. Таким образом, во время движения электровоза происходят периодическое включение и выключение электрической дуги и связанный с этими явлениями процесс коммутации переменного тока с накопителями энергии.

Известно, что при включении синусоидального напряжения в электрической цепи, содержащей индуктивность  $L$  и активное сопротивление  $r$  (рис. 2), образуется переходный процесс, при котором ток  $i$  будет содержать вынужденную  $i_g$  и свободную составляющую  $i_{св}$ :

$$i = i_g + i_{св} \quad (5)$$

При этом  $i_g$  определяется из выражения:

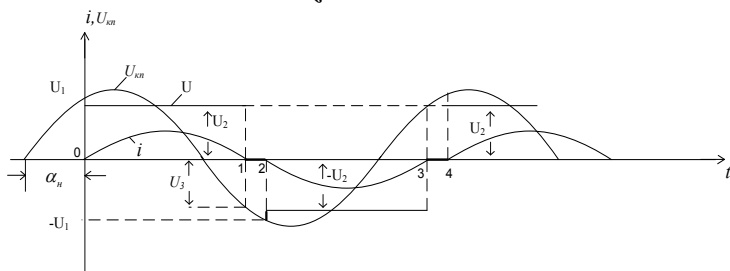
$$i_g = \frac{U_m}{z} \sin(\omega t + \psi - \varphi), \quad (6)$$

$$\text{где } z = \sqrt{(\omega L)^2 + r^2}, \quad \text{tg} \varphi = \frac{\omega L}{r}.$$

А свободная составляющая тока  $i_{св}$  может быть рассчитана по выражению:

$$i_{св} = -\frac{U_m}{z} \sin(\psi - \varphi) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (7)$$

Рис. 4.



где  $\tau = L/r$ ,  $\psi$  – текущее значение фазы синусоидального тока.

Учитывая, что процесс коммутации электрической цепи происходит периодически с некоторым периодом  $T$ , который, в свою очередь, зависит от ряда таких факторов, как толщина льда на контактном проводе, скорость движения электровоза, потребляемый электровозом ток и др., то в переменном тяговом токе электровоза образуется некоторое среднее значение постоянной составляющей тока:

$$I_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T i_{cs}(t) dt. \quad (8)$$

Среднее значение  $I_{cp}$  представляет собой постоянный ток, который протекает в обратной тяговой сети наравне с переменным тяговым током  $i_T$ . Этот ток  $I_{cp}$  проходит через тяговые обмотки дроссель-трансформаторов ДТ (рис. 1) и при наличии асимметрии в рельсовой линии намагничивает магнитную систему дроссель-трансформатора, не имеющую воздушного зазора [3, 4]. В этом случае происходит смещение рабочей точки электромагнитной системы ДТ, и система входит в насыщение, то есть индукция перестает изменяться под действием сигнального тока рельсовой цепи, который тоже протекает через обмотку дроссель-трансформатора, но имеет частоту, отличную от частоты тягового тока. В результате процесса дроссель-трансформатор не наводит ЭДС от сигнального тока в дополнительную обмотку, где подключена аппаратура рельсовой цепи, и напряжение на путевых реле падает до напряжения отпускания якоря реле [5]. Это приводит к ложной занятости рельсовой цепи. Необходимо также заметить, что максимальное значение  $i_{max}$  тока переходного процесса может составлять удвоенное значение амплитуды вынужденного тока  $I_m^e$  (рис. 5).

В эксплуатируемых сейчас рельсовых цепях при электротяге переменного тока асимметрия рельсовой линии оценивается по переменному тяговому току, протекающему через тяговую обмотку дроссель-трансформатора. Установленные нормы на асимметрию по переменному тяговому току

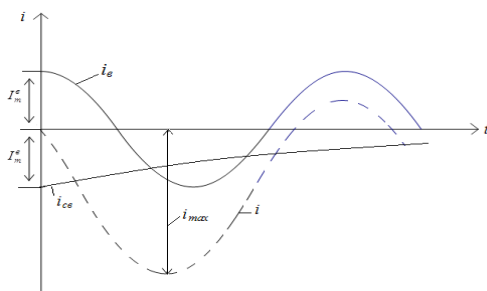


Рис. 5.

обеспечивают устойчивую работу рельсовых цепей в условиях эксплуатации при отсутствии наледи на контактном проводе. Обледенение контактного провода приводит к изменению состава тягового тока, в котором появляется наряду с переменным током частотой 50 Гц и постоянный ток. Причем асимметрия по постоянному току может иметь совершенно другие значения по сравнению с контролируемыми значениями на переменном токе. Это объясняется тем, что, например, при продольной асимметрии рельсовой линии удельное сопротивление рельсов на частоте 50 Гц в 6–8 раз выше, чем удельное сопротивление на постоянном токе. Следует к тому же отметить, что контролировать асимметрию по постоянному току используемыми в эксплуатации измерительными приборами не представляется возможным, да и сама процедура измерения асимметрии по постоянному току не предусмотрена в графике технологического обслуживания рельсовых цепей.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Зевеке Г. В., Ионкин П. А., Нетушил А. В., Страхов С. В. Основы теории цепей. – М.: Энергия, 1975. – 752 с.
2. Аркатов В. С., Кравцов Ю. А., Степенский Б. М. Рельсовые цепи. Анализ работы и техническое обслуживание. – М.: Транспорт, 1990. – 295 с.
3. Иваненко А. А., Зенкович Ю. И., Щербина Е. Г. Защита рельсовых цепей от ложной занятости // Автоматика, связь информатика. – 2011. – № 4. – С. 29–31.
4. Кравцов Ю. А., Зенкович Ю. И., Гоман Е. А. и др. Работа рельсовых цепей в условиях гололедообразования на контактном проводе // Автоматика, связь, информатика. – 2004. – № 5. – С. 17–19.
5. Сороко В. И. Аппаратура железнодорожной автоматики и телемеханики: Справочник. – Т. 1. – М.: Планета, 2000. – 960 с.

Координаты авторов: **Зенкович Ю. И.** – zenkovich@bk.ru, **Иваненко А. А.** – ivanenkoAA@rambler.ru.

Статья поступила в редакцию 21.04.2016, принята к публикации 25.08.2016.



# ANALYSIS OF ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY OF TRACK CIRCUITS AND TRACTION POWER SUPPLY

Zenkovich, Yuri I., Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, Russia.  
Ivanenko, Alexander A., JSC Russian Railways, Moscow, Russia.

## ABSTRACT

The issues of electromagnetic compatibility of traction power supply devices with track circuits are considered in case ice phenomena on the contact wire. The calculated ratios for determining the value

of the bias currents of the choke-transformers in the electric arc, which arises from the formation of ice on the contact wire, as well as the reasons for false occupation of track circuits at the station are analyzed.

**Keywords:** electromagnetic compatibility, track circuit, electric arc, asymmetry coefficient, traction current, contact wire, resistivity of rails.

**Background.** On sections of railways with AC electric traction, there are cases of false occupation of track circuits when icing of the contact wire. As a rule, they take place at stations and very rarely on hauls.

False occupation occurs because of the influence of traction current on the equipment of track circuits and manifests itself when the train approaches the station input signal, when suddenly the permissive signal of the entrance traffic light overlaps the prohibitory indication before the train enters the destination route established for it. As a result, the driver can pass the prohibitive indication of the entrance traffic light, which is qualified by an event associated with violation of safety rules for movement and operation of the railway transport.

**Objective.** The objective of the authors is to analyze electromagnetic compatibility of track circuits and traction power supply.

**Methods.** The authors use general scientific and engineering methods, comparative analysis, mathematical apparatus.

**Results.** We will conduct a detailed analysis of the causes of such failures in the operation of the signaling devices in the period of glacial phenomena on the contact wire. Pic. 1 shows the scheme of traction power supply of an electric locomotive including a traction substation TS, track circuits 1TC-3TC with choke-transformers ChT, to the secondary windings of which the equipment of the feeding end EFE of the track circuit and the equipment of the relay end ERE are connected. Pic. 1 also shows the scheme of current collection of an electric locomotive with electric locomotive traction equipment (ELTE) and traction currents  $i_T, i_{T1}, i_{T2}$ , flowing through the contact wire and along the rails, and  $i_T = i_{T1} + i_{T2}$ .

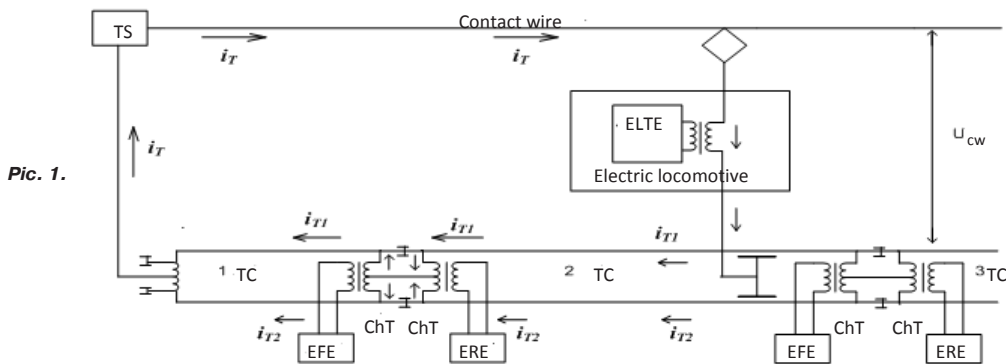
In the formation of ice on the contact wire between the pantograph slide of the electric locomotive and the contact wire, an electric arc arises [1]. To analyze

the conditions for appearance of the arc, an electric circuit for replacing the traction power supply of an electric locomotive in the form shown in Pic. 2 can be used, where L is the equivalent inductance of the transformer of the traction substation TS and the electric locomotive transformer. Resistance of the contact wire and rails of the reverse traction network can be considered as an active value of r, since their inductance is many times less than the value L. The switch S will simulate the process of the electric locomotive entering the area with ice on the contact wire and, therefore, the transient process that causes the ignition of the electric arc, the voltage at which is denoted by U.

Pic. 3 shows an approximate piecewise linear approximation of the electric arc characteristic. As long as the voltage between the graphite insert of the current collector of the electric locomotive and the contact wire does not reach the value  $U_1$ , the arc does not burn and the electric circuit with the cut-off switch S (Pic. 2) is broken. When the arc voltage rises to  $U_1$ , the arc is ignited and the voltage  $U_2$  is set on it. The decrease in voltage from the value  $U_1$  to  $U_2$  does not occur immediately, however, at a low frequency of the source  $U_{cw}$  equal to 50 Hz and with a simplified consideration of the problem without taking into account the inertia of the arc, this time can be neglected and it is assumed that immediately after ignition of the arc, the voltage  $U_2$  is set on it. The voltage on the arc  $U_2$  remains unchanged, until the moment when the current in the circuit passes through zero and the arc goes out. If the timing of the arc ignition is selected as the time reference point, the transient process in the electrical circuit of the scheme (Pic. 2) will be characterized by the following parameters:

$$U_{cw} = U_c \cdot \sin(\omega t + \alpha_v) - U_2, \tag{1}$$

where  $\alpha_v = \arcsin\left(\frac{U_1}{U_c}\right)$ .



Pic. 1.



In this case, the current of the transient for  $i > 0$  can be represented as:

$$i = \frac{U_c}{z} \cdot \left[ \frac{\sin(\omega t + \alpha_v - \varphi)}{e^{\frac{t}{\tau}} \cdot \sin(\alpha_v - \varphi)} \right] - \frac{U_2}{r} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}), \quad (2)$$

where  $\phi = \arctg(\omega L/r)$ ,  $z = \sqrt{(\omega L)^2 + r^2}$ ,  $\tau = L/r$ .

Pic. 4 shows the graphs of dependence of voltage  $U_{cw}$  and the current  $i$ , as well as the voltage across the arc  $U = \pm U_2$ . As can be seen from the graph, the steady-state current mode  $i$  in the time interval from 0 to 1 is determined by the time-varying voltage  $U_{cw}$ , which does not reach the value  $U_1$  and is described by the equation (2). The intervals of arc extinction between currents 1–2 and 3–4 depend on the parameters of the electrical circuit and can be reduced to zero, that is, the electric arc can burn continuously. The condition for continuous combustion in this case is the relationship between the voltages at point 1 (Pic. 4) when  $U_3 \geq U_1$ , which in turn depends on the amplitude value  $U_c$  on the contact wire and the inductance  $L$ .

For sufficiently large values of  $L$  and  $U_c$ , the arc can burn continuously. Let's consider the conditions under which this will occur.

If, for  $i = 0$ , the voltage  $U = |U_3| \geq |-U_1|$ , then the arc burns without interruptions, and points 1 and 2, 3 and 4 respectively merge into one. In this case, the steady-state mode will occur when the angle  $\alpha_v$  changes and takes a certain largest value  $\alpha_c$ .

The voltage of the source, at which the polarity of the arc current changes, will also increase to a certain value  $U > |-U_1|$ .

The value of  $\alpha_c$  can be determined from the condition that the time between the moments of ignition of the arc and the passage of the current through zero is equal to half the period  $\pi$ . In this case we will have:

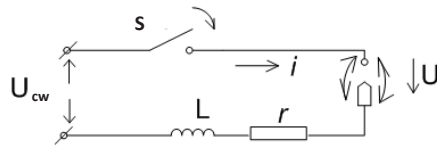
$$\frac{U_c}{z} \left[ \sin(\alpha_c - \varphi + \pi) - e^{-\frac{\pi}{\omega\tau}} \cdot \sin(\alpha_c - \varphi) \right] - \frac{U_2}{r} (1 - e^{-\frac{\pi}{\omega\tau}}) = 0, \quad (3)$$

hence:

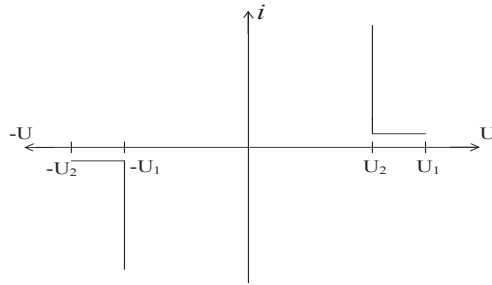
$$\alpha_c = \varphi - \arcsin \left( \frac{U_2 \cdot z \cdot (1 - e^{-\frac{\pi}{\omega\tau}})}{U_c \cdot r \cdot (1 + e^{-\frac{\pi}{\omega\tau}})} \right). \quad (4)$$

With the existing values of the inductance  $L$  and the voltage of the traction power grid, the arc burns continuously. However, the process of continuous combustion cannot cause a malfunction in the operation of the signaling devices, since the current  $i$  does not contain a constant component, and from the higher harmonic components of this current there is a sufficiently reliable protection based on the use of synchronous phase-sensitive receivers of the DSSh type [2], in which the track and local circuits are powered by different and independent power sources.

At the same time, it should be noted that the electric arc is accompanied by a powerful thermal process, which emits a huge amount of heat into the environment. The electric power output is on average from 50 to 100 kVA. Such energy is able to instantaneously melt ice in the vicinity of the current collector's panel and restore contact in the electric locomotive power system, that is, to extinguish the electric arc. After the extinction of the arc and the cooling of the elements of the electric locomotive's



Pic. 2.



Pic. 3.

current collector, when it moves continuously, there is again run-over the ice on the contact wire and the ignition of the electric arc. Thus, during the movement of an electric locomotive, periodic switching-on and switching-off of the electric arc and the process of commutation of the alternating current with energy storage devices connected with these phenomena occur.

It is known that when sinusoidal voltage is switched on in an electrical circuit containing inductance  $L$  and the active resistance  $r$  (Pic. 2), a transient process is formed at which the current  $i$  will contain the forced  $i_f$  and the free component  $i_{fr}$ :

$$i = i_f + i_{fr}, \quad (5)$$

At the same time  $i_f$  is determined from the expression:

$$i_f = \frac{U_c}{z} \sin(\omega t + \psi - \varphi), \quad (6)$$

where  $z = \sqrt{(\omega L)^2 + r^2}$ ,  $\text{tg} \varphi = \frac{\omega L}{r}$ .

And the free current component  $i_{fr}$  can be calculated by the expression:

$$i_{fr} = -\frac{U_c}{z} \cdot \sin(\psi - \varphi) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (7)$$

where  $\tau = L/r$ ,  $\psi$  – current value of the sinusoidal current phase.

Given that the process of commutation of an electrical circuit occurs periodically with a certain period  $T$ , which in turn depends on a number of factors such as the thickness of the ice on the contact wire, the speed of the electric locomotive, the current consumed by the electric locomotive, etc., then in the alternating traction current of the electric locomotive a certain average value of the constant component of the current is formed:

$$I_{av} = \frac{1}{T} \int_0^T i_{fr}(t) dt. \quad (8)$$

The average value  $I_{av}$  is a direct current that flows in the reverse traction network on a par with the variable traction current  $i_f$ . This current  $I_{av}$  passes through the traction windings of the choke-transformers ChT (see Pic. 1) and, in the presence of asymmetry in the track circuit, magnetizes the magnetic system of the choke-transformer, which



