ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА И АНАЛИЗА ФАЗОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ РЕЛЬСОВЫХ ЦЕПЕЙ 25 *гц*

Н. Ф. Котляренко, Ю. В. Соболев, С. А. Шевченко

Харьков

Широкая электрификация участков железных дорог на переменном токе сопровождается разработкой и внедрением новых схем рельсовых цепей. В условиях возросших скоростей движения, а следовательно, и величины тягового тока, рельсовые цепи подвергаются мощному воздействию помех, что потребовало совершенствования существующих и создания новых, более эффективных методов защиты.

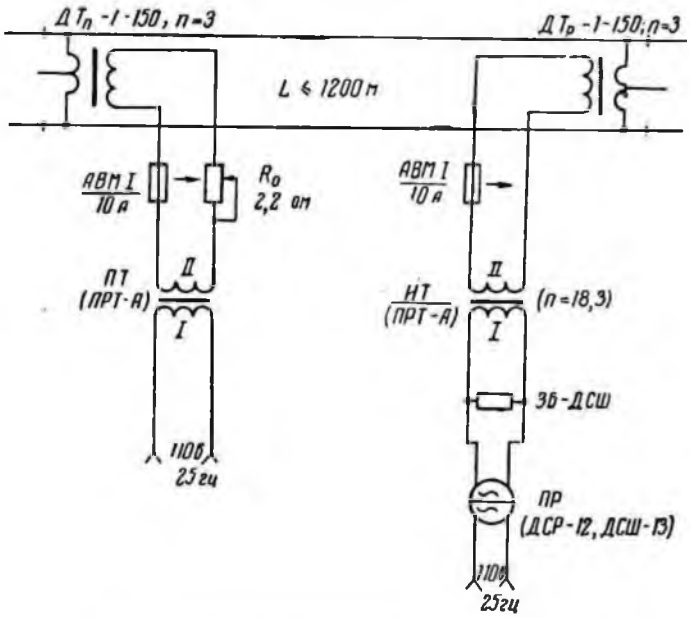

Рис. 1. Фазочувствительная рельсовая цепь 25 *гц*.

Анализ различных методов защиты рельсовых цепей от помех тягового тока показал, что наиболее надежен и прост фазовый метод, обладающий также высокими техническими возможностями контроля замыкания изолирующих стыков. В связи с этим в течение нескольких лет многие коллективы институтов и проектных организаций вели интенсивную разработку рельсовых цепей с непрерывным питанием и фазочувствительными приемниками.

В последние годы ЦНИИ МПС разработал фазочувствительные рельсовые цепи 25 *гц* с двухэлементными путевыми приемниками (рис. 1), в которых используется качественно новый способ двухфазно-

го питания, полученный в результате двух раздельных параметрических делителей частоты ПЧ-50/25 *гц*, питающих путевые трансформаторы и местные обмотки реле. При этом схема включения делителей частоты 50/25 *гц* устойчиво обеспечивает на выходе два напряжения, необходимые для питания рельсовых цепей; напряжения сдвинуты по фазе на 90°, что позволяет довольно легко поддерживать в путевом реле практически идеальные фазовые соотношения [1].

Однако рельсовые цепи 25 *гц* с фазочувствительными приемниками и двухфазной системой питания являются наиболее сложными. Вследствие этого многообразные вопросы, возникающие при их эксплуатации, остаются неясными, что, естественно, создает определенные трудности, возникающие при правильном содержании и регулировке этих цепей.

В настоящей статье излагается графоаналитический метод расчета и анализа цепей 25 *гц*, позволяющий с помощью диаграммы надежного действия весьма удобно и наглядно анализировать их работу, выбирать параметры схемы, а также доказывать необходимость двухфазной системы питания.

1. Общая методика расчета

Расчет и анализ рельсовых цепей с двухэлементными путевыми реле усложняется необходимостью учета фазовых соотношений между током реле и напряжением источника питания, которые определяются аргументом сопротивления передачи цепи

$$Z_{\text{п}} = \frac{\dot{U}_{\text{т}}}{\dot{I}_{\text{р}}} = |Z_{\text{п}}| e^{j\varphi_{\text{п}}}.$$

В связи с этим наиболее удобно производить расчет указанных цепей графоаналитическими методами, которые позволяют наглядно ощутить характер и степень влияния параметров составных элементов цепи на общий фазовый сдвиг в ней.

При заданных параметрах путевого реле и других составных элементов рельсовой цепи особенность расчета заключается в выборе параметров ограничителя, оказывающего существенное влияние на фазовые соотношения в реле, величину потребляемой мощности и реакцию цепи при наложении шунта.

Данная задача решается графоаналитическим методом, сущность которого состоит в применении общей векторной диаграммы цепи, при помощи которой строятся граничные линии нормативной шунтовой чувствительности, определяется область согласованного выбора параметров ограничителя и анализируется рельсовая цепь при нормальном и шунтовом режимах. Все графические построения диаграммы надежного действия цепи осуществляются на основании предварительных расчетов, выполненных для рассматриваемых режимов в предположении идеальных фазовых соотношений в реле. Учет же действительных фазовых соотношений и соответствующая корректировка вращающего момента реле производится при выборе параметров ограничителя и напряжения путевого трансформатора.

Рассматриваемый метод иллюстрируется на примере расчета и анализа рельсовой цепи 25 *гц* с двухэлементным путевым реле ДСР-12 и дроссель-трансформаторами ДТ-1-150, имеющей предельную длину 1200 *м*.

2. Предварительные расчеты рельсовой цепи

В качестве расчетной схемы для нормального режима используется основная схема замещения рельсовой цепи, изображенная на рис. 2.

В результате предварительных расчетов, производимых любым из известных способов, определяются модуль и аргумент векторов тока путевого трансформатора $\dot{I}_т$, а также напряжения $\dot{U}_{д.н}$ на дополнительной обмотке дроссель-трансформатора питающего конца при максимальной удельной проводимости изоляции $g_{и\ макс} = 1\ \frac{сим}{км}$ и удельном сопротивлении рельсов $z = 0{,}5e^{j52°}\ \frac{ом}{км}$.

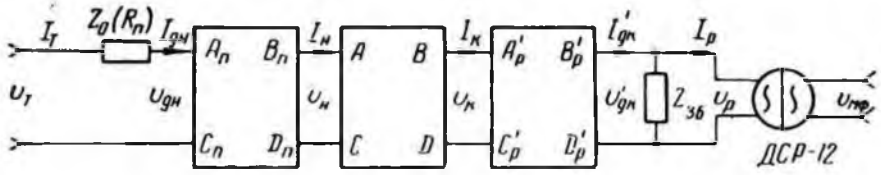

Рис. 2. Основная схема замещения рельсовой цепи.

Предварительный расчет шунтового режима заключается в определении аналогичных величин при минимальной проводимости изоляции $g_{и\ мин} = 0$ и расположении нормативного шунта $R_ш = 0{,}06$ *ом* на релейном и питающем концах рельсовой линии.

Исходными данными для предварительного расчета шунтового режима являются параметры надежного отпадания сектора путевого реле типа ДСР-12:

$$U_{р.о} = 5{,}1e^{j72°}b;\ I_{р.о} = 0{,}015a.$$

Результаты предварительных расчетов рельсовой цепи сведены в таблицу.

Параметры векторов	Нормальный режим		Шунтовой режим			
	$U_{д.н}$	$I_т$	$U_{д.н.п}$	$I_{тп}$	$U_{д.н.р}$	$I_{тр}$
Модуль	2,63 *в*	0,716 *а*	1,33 *в*	2,23 *а*	4,1 *в*	1,1 *а*
Аргумент	91°20′	47°5′	89°30′	74°45′	112°50′	60°10′

3. Методика построения общей векторной диаграммы и линии нормативной шунтовой чувствительности

Общая векторная диаграмма цепи строится с учетом следующих положений.

Максимальное напряжение путевого трансформатора при нормальном режиме $\dot{U}_{т\ макс}$ (рис. 2) равно геометрической сумме напряжения $U_{д.н\ макс}$ на дополнительной обмотке дроссель-трансформатора питающего конца и падения напряжения на ограничителе Z_0

$$\dot{U}_{т\ макс} = \dot{U}_{д.н\ макс} + \dot{I}_{т\ макс} Z_0, \qquad (1)$$

где $\dot{U}_{д.н\ макс} = 1{,}2U_{дн}$;

$\dot{I}_{т\ макс} = 1{,}2\dot{I}_т$.

По аналогии запишем уравнения для максимально допустимых напряжений путевого трансформатора при шунтировании релейного и питающего концов:

$$\dot{U}_{тр} = \dot{U}_{д.н.р} + \dot{I}_{тр}Z_0; \tag{2}$$

$$\dot{U}_{тп} = \dot{U}_{д.н.п} + \dot{I}_{тп}Z_0. \tag{3}$$

Учитывая угол расстройки путевого реле, приведенные напряжения путевого реле и напряжения путевого трансформатора при нормальном и шунтовом режимах будут равны

$$\dot{U}'_{т\,макс} = \frac{\dot{U}_{т\,макс}}{\cos\bar{\beta}_н}; \tag{4}$$

$$\dot{U}'_{тр} = \frac{\dot{U}_{тр}}{\cos\bar{\beta}_р};$$

$$\dot{U}'_{тп} = \frac{\dot{U}_{тп}}{\cos\bar{\beta}_п},$$

где $\bar{\beta}_н$, $\bar{\beta}_р$ и $\bar{\beta}_п$ — углы расстройки реле при нормальном режиме и шунтировании релейного и питающего концов цепи.

Согласно методу сравнения напряжений, шунтовой эффект обеспечивается при соблюдении условия

$$|U_{т\,макс}| \leqslant |U'_{тр}|; \ |U_{т\,макс}| \leqslant |U'_{тп}|. \tag{5}$$

При введении коэффициентов шунтовой чувствительности, дающих количественное выражение степени надежности шунтирования

$$k_{шр} = \frac{|U'_{тр}|}{|U'_{т.макс}|} \geqslant 1;$$

$$k_{шп} = \frac{|U'_{тп}|}{|U_{т\,макс}|} \geqslant 1. \tag{6}$$

Граничным случаем надежности для шунтового эффекта является равенство приведенных напряжений, при которых коэффициенты $\bar{k}_{шр}$ и $k_{шп}$ равны единице.

Построение векторной диаграммы рельсовой цепи, являющейся общей для нормального режима и режимов шунтирования релейного и питающего концов цепи, сводится к графическому решению уравнений (1) — (6).

Основой диаграммы являются полученные из предварительных расчетов векторы $\dot{U}_{д.н\ макс}$, $\dot{I}_{т\,макс}$, $\dot{U}_{д.н.р}$, $\dot{I}_{тр}$, $\dot{U}_{д.н.п}$ и $\dot{I}_{тп}$ (см. таблицу), которые строятся в выбранном масштабе из общего полюса; вектор тока $\dot{I}_р$ принимаем за начальный (рис. 3). На диаграмму наносится также направление вектора местного напряжения $\dot{U}_{мф}$. По условиям идеальных фазовых соотношений для реле ДСР-12 при двухфазной системе питания рельсовой цепи 25 *гц* вектор местного напряжения опережает вектор тока реле $\dot{I}_р$ на угол $\alpha_и = 72°$.

Если сопротивление ограничителя считать активным, векторы падения напряжений на нем совпадают по фазе с векторами токов трансформатора. Поэтому из концов векторов $\dot{U}_{д.н\,макс}$, $\dot{U}_{днп}$ и $\dot{U}_{днр}$ параллельно векторам соответствующих токов $\dot{I}_{т\,макс}$, $\dot{I}_{тп}$ и $\dot{I}_{тр}$ проводятся

линии, на которых в выбранном масштабе откладываются падения напряжений при различных значениях ограничителя $R_п$.

Выбрав на этих линиях точки, соответствующие, например, $R_п = 1{,}5$ *ом*, и соединив их с полюсом диаграммы, получаем искомые векторы напряжений $\dot{U}_{т\,макс}$, $\dot{U}_{тп}$ и $\dot{U}_{тр}$.

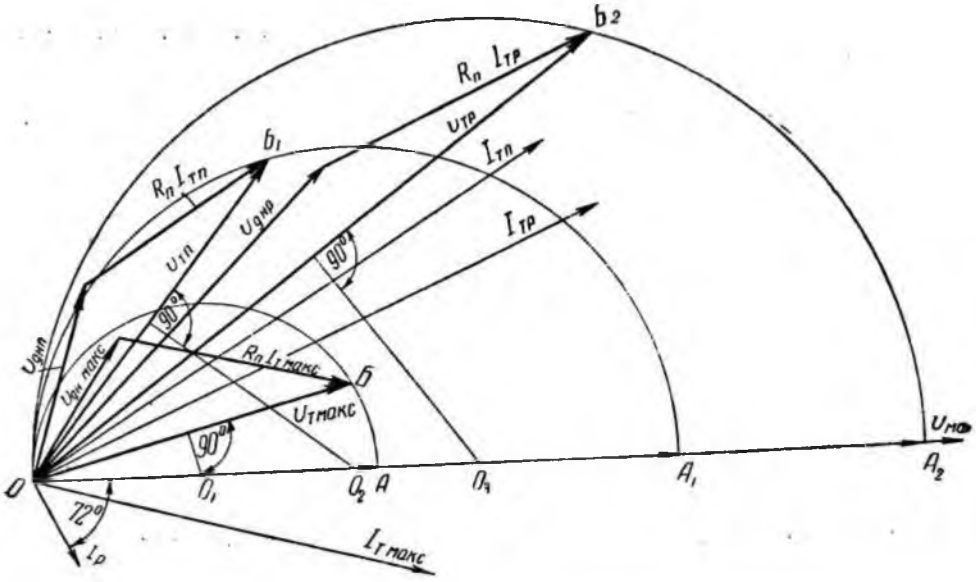

Рис. 3. Метод построения общей векторной диаграммы рельсовой цепи.

Если из середины вектора $\dot{U}_{т\,макс}$ восстановить перпендикуляр до пересечения с вектором местного напряжения $\dot{U}_{мф}$ и из точки пересечения (точка O_1), как из центра провести полуокружность, проходящую через полюс диаграммы и конец вектора $\dot{U}_{т\,макс}$, диаметр этой полуокружности ОА в масштабе напряжений укажет величину максимального приведенного напряжения трансформатора $\dot{U}_{т\,макс}$.

Аналогичным построением определяются и полуокружности приведенных напряжений при шунтировании питающего и релейного концов для $R_п = 1{,}5$ *ом*, диаметры которых (OA_1 и OA_2) будут являться приведенными напряжениями $\dot{U}_{тп}$ и $\dot{U}_{тр}$.

Из графических построений видно, что коэффициенты шунтовой чувствительности больше единицы, и следовательно, ограничитель выбран правильно, если полуокружность максимального приведенного напряжения при нормальном режиме лежит внутри полуокружностей приведенных допустимых напряжений при шунтовом режиме. Граничным случаем обеспечения шунтового эффекта является совпадение указанных полуокружностей.

Последнее обстоятельство позволяет построить граничную линию нормативной шунтовой чувствительности питающего и релейного концов, представляющей собой геометрическое место значений ограничителя рельсовой цепи, при которых коэффициенты шунтовой чувствительности $k_{шп}$ и $k_{шр}$ равны единице.

4. Диаграмма надежности действия рельсовой цепи и ее анализ

Диаграмма надежности действия цепи (рис. 4) строится на основании совмещенной линии нормативной шунтовой чувствительности питающего и релейного концов с учетом основных требований нормального, шунтового и контрольного режимов. Метод построения такой диаграммы подробно изложен в работе [2].

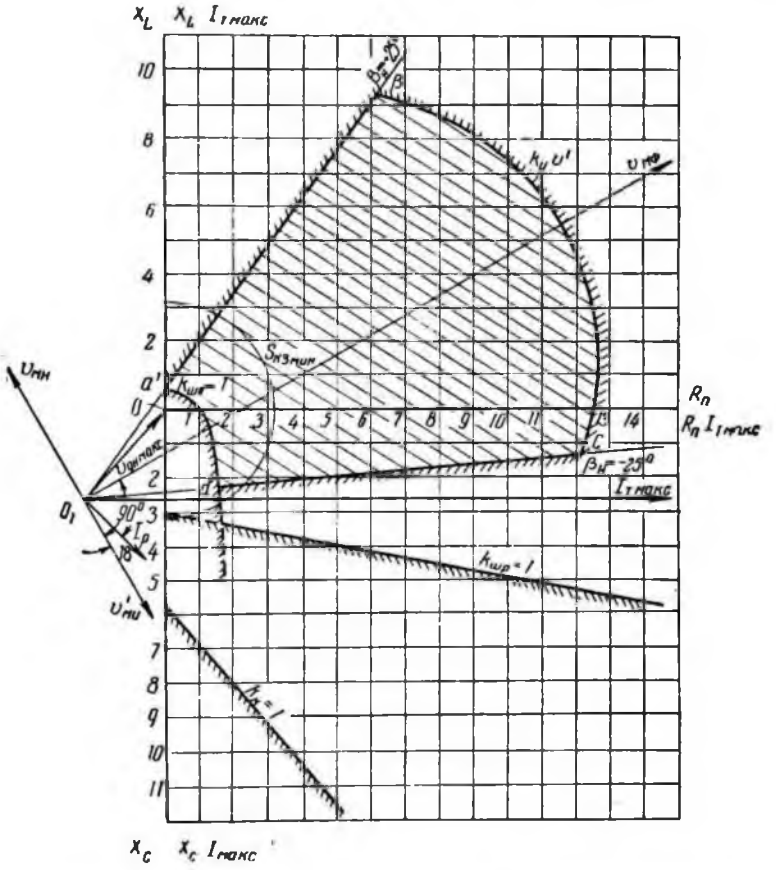

Рис. 4. Диаграмма надежности действия цепи при двухфазной системе питания.

Совмещенная линия нормативной шунтовой чувствительности определяет область, где должны быть выбраны величина и характер ограничителя питающего конца по условиям шунтового режима. При всех значениях ограничителя, лежащих ниже этой линии, шунтовой эффект не обеспечивается.

По условиям нормального режима область выбора сопротивления питающего конца цепи ограничивается допустимым углом расстройки реле и максимальным рабочим напряжением трансформатора, а по условиям режима короткого замыкания — оптимальной величиной мощности короткого замыкания.

С этой целью на диаграмме выделяется область параметров сопротивления $R_п$, ограниченная линиями углов $\beta_н = \pm 25^0$, предельно допустимой расстройки реле при нормальном режиме, $k_{шп} = 1$ и $k_{шр} = 1$ — нормативной шунтовой чувствительности на питающем и релейном кон-

це и $k_и U'$ — максимального рабочего напряжения трансформатора. На этой же диаграмме проведена линия $S_{кз.мин}$ оптимального значения модуля ограничителя по режиму короткого замыкания, а также $k_к$ — линия допустимой чувствительности по контролю поврежденного рельса (рис. 4). Очевидно, что работа рассматриваемой рельсовой цепи 25 *гц* при $l = 1{,}2$ *км* возможна при любых значениях ограничителя, соответствующих любой точке, расположенной в заштрихованной мишени *abcd*. Однако самая экономичная работа цепи в области точек *a* и *d* и линии $S_{кз.мин}$.

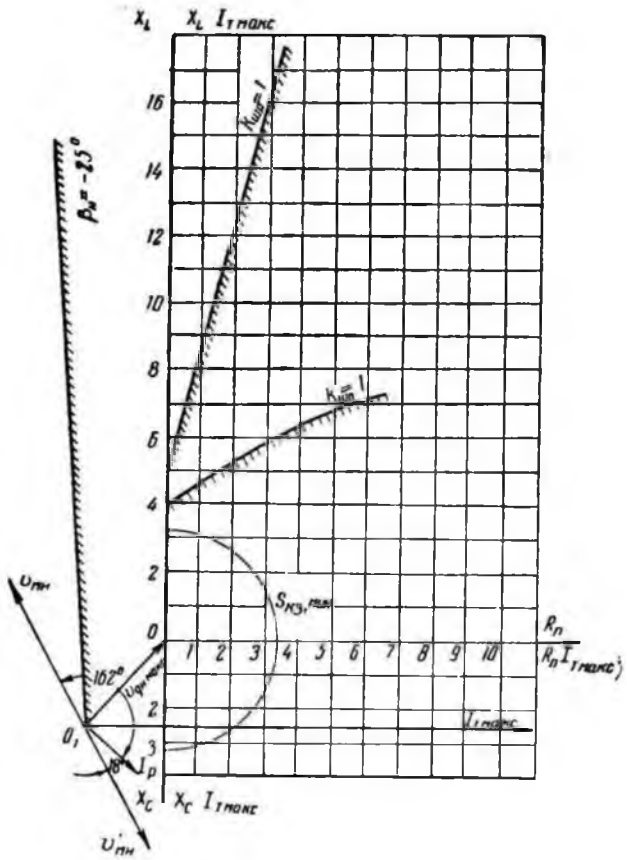

Рис. 5. Диаграмма надежности действия цепи без учета фазового сдвига.

Как видно из диаграммы, эта область определяет активный характер ограничителя, оптимальная величина которого находится в пределах 1,0—3 *ом*.

Таким образом, в качестве ограничителя питающего конца можно применять регулируемое сопротивление 2,2 *ом*, 10 *а*. Однако в процессе эксплуатации для обеспечения нормальной работы рельсовой цепи необходимо, чтобы величина этого сопротивления с учетом соединительных проводов между рельсами и путевым трансформатором устанавливалась не ниже 1,5 *ом*. В этом случае имеется запас шунтовой чувствительности на обоих концах, надежно обеспечивается контроль поврежденного рельса, весьма благоприятны условия режима короткого за-

мыкания и практически идеальные фазовые соотношения в реле при нормальном режиме.

Диаграмма наглядно показывает, что достижение идеальных фазовых соотношений в путевом реле ДСР-12 с помощью простых средств регулировки стало возможным благодаря двухфазной системе питания, обеспечивающей в рельсовой цепи фазовый сдвиг 90°.

Для доказательства преимущества двухфазной системы питания на рис. 5 представлена диаграмма надежности действия цепи, построенная без учета фазового сдвига, т. е. при нефазированном напряжении местной обмотки путевого реле.

Как видно из чертежа, в рассматриваемом случае для обеспечения шунтового эффекта характер ограничителя питающего конца рельсовой цепи должен быть индуктивным. При этом, однако, нельзя обеспечить требования нормального режима, поскольку угол расстройки путевого реле превосходит всякие допустимые пределы. Отсутствует также и выбор оптимального значения ограничителя по режиму короткого замыкания.

Таким образом, из анализа диаграммы видно, что рельсовая цепь 25 *гц* при однофазном питании и заданных параметрах составных элементов схемы не может обеспечить требования нормального и шунтового режимов одновременно ни при одном из значений индуктивного ограничителя. Применение дополнительных элементов для поддержания необходимых фазовых соотношений в реле привело бы не только к усложнению схемы и способов регулировки рельсовой цепи, но и к существенному снижению ее надежности.

Не менее важным достоинством рельсовых цепей 25 *гц* при двухфазном питании является также то, что они работают одинаково устойчиво во всем диапазоне длины рельсовой линии и значений предельно допустимых норм изоляции без изменения параметров составных элементов. Подтверждением этого вывода является аналогия диаграмм рельсовых цепей, построенных для длин 1,2, 0,5, 0,25 и 0,1 *км*, при значениях максимальной проводимости изоляции в пределах 1—0,3 *сим/км*.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. Ф. Пенкин, А. А. Талыков, А. П. Разгонов. Фазочувствительные рельсовые цепи 25 *гц* с двухэлементными путевыми реле. «Автоматика, телемеханика и связь», 1967, № 3.

2. Н. Ф. Котляренко, В. Ф. Волков. Графоаналитический метод расчета и анализа рельсовых цепей переменного тока. Труды ЛЭТИИЖТа, вып. VI, 1954.

3. Н. Ф. Котляренко. Электрические рельсовые цепи. Трансжелдориздат, 1961.

ПРИМЕНЕНИЕ ТИРИСТОРОВ В КАЧЕСТВЕ ФАЗОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПОРОГОВОГО ДЕЙСТВИЯ

А. С. Капуста, С. А. Шевченко

Харьков

В технике железнодорожной автоматики и телемеханики все более широко используются новые полупроводниковые элементы, позволяющие разрабатывать и внедрять в эксплуатацию современные высоконадежные приборы и устройства.

Несмотря на жесткие требования к устройствам автоматики, вытекающие из условий безопасного и бесперебойного движения поездов, применение полупроводниковых элементов, согласно положениям дей-