

# Оценка мер центральной тенденции параметров контролируемых релейной защитой фидеров контактной сети

Р. С. Трифонов<sup>1</sup>, Д. А. Яковлев<sup>1</sup>, С. А. Филиппов<sup>1</sup>, О. А. Соловьева<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Россия, 672040, г. Чита, ул. Магистральная, д. 11, Забайкальский институт железнодорожного транспорта

E-mail: [rttrif@rambler.ru](mailto:rttrif@rambler.ru)

**Аннотация.** В данной статье рассмотрена значимость возможных входных величин резервных ступеней дистанционных защит фидеров контактной сети с точки зрения влияния на достоверность работы защиты. На основе теории статистики проведена оценка мер центральной тенденции параметров, контролируемых релейной защитой фидеров контактной сети на примере Забайкальской железной дороги за 2018-2019 годы. Измерения 14 параметров согласно ГОСТ 32144-2013. «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения», проведенные в 2020 году на фидере контактной сети тяговой подстанции «Сохондо» Забайкальской железной дороги на основе 88965290 полученных значений позволили выбрать из всех возможных для наблюдения параметров значимые на основе математического анализа. Рассматривались и анализировались статистика по следующим параметрам: действующее значение напряжения, действующее значение тока, коэффициент пиковых амплитуд напряжения, коэффициент пиковых амплитуд тока, коэффициент гармонических искажений напряжения, коэффициент гармонических искажений тока, коэффициента сдвига фаз, сопротивления нагрузки, угла между первыми гармониками напряжения на шинах подстанции и током фидера. Обоснованный выбор авторами значимых параметров позволяет совершенствовать работу резервных ступеней дистанционных защит фидеров контактной сети в условиях тяжеловесного движения и повысить ее селективность.

## 1. Введение

Холдинг «Российские железные дороги» является динамически развивающейся компанией, имеющий ряд стратегических целей, обозначенных в [1].

Анализ текущего состояния инфраструктуры, выполненный в блоке 5.3 [1], указывает на следующие ключевые проблемы, с которыми столкнулась компания на момент разработки стратегии:

- несоответствие уровня пропускной способности на отдельных направлениях спросу со стороны рынка перевозок, наличие около 10,2 тыс. км «узких мест»;
- высокий износ отдельных элементов инфраструктуры;
- отсутствие возможностей для прорывного роста надежности, скорости и точности перевозок.

В этом же разделе [1] к ключевым задачам развития инфраструктуры холдинга отнесены в том числе следующие задачи:

- развитие инфраструктуры с целью перехода на тяжеловесное движение с весовыми нормами поездов 9 тысяч тонн и более;
- оптимизация издержек за счет роста энергоэффективности и производительности труда, рациональной организации ремонтных и эксплуатационных работ;
- повышение безопасности перевозок и снижение рисков, связанных с влиянием «человеческого фактора» на производственный процесс.

С момента начала реализации стратегии развития к 2020 году уже многое достигнуто. Так на Забайкальской железной дороге уже более пяти лет обращаются сдвоенные поезда повышенной массы 12600 тонн по режимным картам, что соответствует в целом стратегическим задачам и целям, обозначенным в [1].

Однако, увеличение массы составов в ряде случаев весьма негативно сказывается на работе направленной дистанционной защиты фидеров контактной сети (НДЗ ФКС), в частности третьей резервной ступени. Увеличение массы составов при одновременном уменьшении межпоездного интервала с целью оптимизации экономических показателей привело к тому, что максимальные рабочие токи стали стремиться к своему максимально допустимому значению в рабочем режиме, что в свою очередь приводит к снижению напряжения фидера контактной сети в ряде случаев до минимально допустимого значения, особенно на участках со сложным профилем пути к которым относится и Забайкальская железная дорога понижение напряжения может привести к останову составов. Увеличение тока – к пережогам контактного провода и ложным отключениям – опять останов, износ коммутационного оборудования.

Математически в общем виде это можно представить следующим образом. Многообразие факторов, оказывающих влияние на работу резервной ступени дистанционной защиты фидеров контактной сети, можно условно разделить на два класса – внешние(эндогенные) и внутренние (экзогенные):

$$\mathbf{O}_1(t) = \mathbf{S} \cup \mathbf{T}, \quad (1)$$

где  $\mathbf{O}_1(t)$  – m-мерная вектор-функция, характеризующая совокупность внешних первичных влияющих факторов;

$\mathbf{S}$  – m-мерный вектор, определяющий состояние системы внешнего электроснабжения (СВЭ);

$\mathbf{T}$  – m-мерный вектор, описывающий состояние системы тягового электроснабжения (СТЭ), связанное с параметрами тяговой сети защищаемой фидерной зоны.

Параметры СВЭ определяются состоянием вектора  $\mathbf{S}$ , зависящего от следующих величин:

$$\mathbf{S} = [\mathbf{P}, \mathbf{Q}, \cos \varphi, \mathbf{U}, \mathbf{X}_s]^T, \quad (2)$$

где  $\mathbf{P}$  – m-мерная вектор-функция, характеризующая активную мощность, передаваемую через СВЭ;

$\mathbf{Q}$  – m-мерная вектор-функция, определяющая реактивную мощность, передаваемую через СВЭ;

$\cos \varphi$  – коэффициент активной мощности СВЭ;

$\mathbf{U}$  – m-мерная вектор-функция, представляющая уровень напряжения СВЭ;

$\mathbf{X}_s$  – m-мерная вектор-функция, описывающая сопротивление СВЭ до тяговой подстанции, на которой устанавливается защита.

Параметры СТЭ, в свою очередь, определяются состоянием вектора  $\mathbf{T}$ , зависящего от следующих переменных:

$$\mathbf{T} = [\mathbf{K}, \mathbf{F}, \mathbf{W}, \mathbf{Q}, \mathbf{M}, \mathbf{P}]^T, \quad (3)$$

где  $\mathbf{K}$  –  $m$ -мерный вектор, характеризующий тип тяговой сети защищаемой фидерной зоны;  
 $\mathbf{F}$  –  $m$ -мерный вектор, описывающий состояние СТЭ, связанное с параметрами движения на защищаемой фидерной зоне;  
 $\mathbf{W}$  –  $m$ -мерный вектор, определяющий параметры тяговых подстанций;  
 $\mathbf{Q}$  –  $m$ -мерный вектор, характеризующий параметры электроподвижных составов, обращающихся на защищаемом участке;  
 $\mathbf{M}$  –  $m$ -мерный вектор, представляющий параметры массы поездов, обращающихся на защищаемом участке;  
 $\mathbf{P}$  –  $m$ -мерный вектор, характеризующий профиль пути защищаемого участка.

Множество внешних (*эндогенных*) вторичных факторов характеризует параметры режима, в котором находится защищаемая система, и подразделяются на два подмножества -  $\mathbf{O}_{\Pi n}(t)$  и  $\mathbf{O}_{\Pi k}(t)$ , характеризующих текущий режим системы.

Множество параметров нормального режима характеризуется состоянием вектора  $\mathbf{O}_{\Pi n}(t)$ :

$$\mathbf{O}_{\Pi n}(t) = [\mathbf{I}_n(t), \mathbf{U}_n(t), \lambda, \mathbf{V}_I, \mathbf{V}_U, \Phi_{nI_k}, \Phi_{nU_k}]^T, \quad (4)$$

где  $\mathbf{O}_{\Pi n}(t)$  –  $m$ -мерная вектор-функция, характеризующая совокупность внешних вторичных влияющих факторов в нормальном режиме;

$\mathbf{I}_n(t)$  –  $m$ -мерная вектор-функция, определяющая ток защищаемого фидера в нормальном режиме;

$\mathbf{U}_n(t)$  –  $m$ -мерная вектор-функция, описывающая напряжение в тяговой сети защищаемого фидера в нормальном режиме;

$\lambda$  – коэффициент мощности системы;

$\mathbf{V}_I$  –  $m$ -мерная вектор-функция, характеризующая гармонический состав тока тяговой сети;

$\mathbf{V}_U$  –  $m$ -мерная вектор-функция, характеризующая гармонический состав напряжения тяговой сети;

$\Phi_{nI_k}$  –  $m$ -мерный вектор, представляющий угол тока  $k$ -й гармоники в нормальном режиме;

$\Phi_{nU_k}$  –  $m$ -мерный вектор, характеризующий угол напряжения  $k$ -й гармоники в нормальном режиме.

Множество параметров аварийного режима характеризуется состоянием вектора  $\mathbf{O}_{\Pi k}(t)$ :

$$\mathbf{O}_{\Pi k}(t) = [\mathbf{I}_k(t), \mathbf{U}_k(t), \Phi_{kI_k}, \Phi_{kU_k}, \mathbf{S}, \mathbf{T}, \mathbf{W}]^T, \quad (5)$$

где  $\mathbf{O}_{\Pi k}(t)$  –  $m$ -мерная вектор-функция, характеризующая совокупность внешних вторичных влияющих факторов в аварийном режиме;

$\mathbf{I}_k(t)$  –  $m$ -мерная вектор-функция, описывающая ток защищаемого фидера в аварийном режиме;

$\mathbf{U}_k(t)$  –  $m$ -мерная вектор-функция, определяющая напряжение в тяговой сети защищаемого фидера в аварийном режиме;

$\Phi_{kI_k}$  –  $m$ -мерный вектор, представляющий угол тока  $k$ -й гармоники в аварийном режиме;

$\Phi_{kU_k}$  –  $m$ -мерный вектор, характеризующий угол напряжения  $k$ -й гармоники в аварийном режиме.

Внешние факторы взаимосвязаны между собой:  $\mathbf{O}_{\Pi n}(t) \subseteq \mathbf{O}_I(t)$ ,  $\mathbf{O}_{\Pi k}(t) \subseteq \mathbf{O}_I(t)$ . Различное сочетание первичных факторов ведет к разнообразным изменениям внутри ограниченной

области значений вторичных для каждого режима:  $\mathbf{O}_{\Pi_{\text{н min}}}(t) \leq \mathbf{O}_{\Pi_{\text{н}}}(t) \leq \mathbf{O}_{\Pi_{\text{н max}}}(t)$ ,  $\mathbf{O}_{\Pi_{\text{к min}}}(t) \leq \mathbf{O}_{\Pi_{\text{к}}}(t) \leq \mathbf{O}_{\Pi_{\text{к max}}}(t)$ .

Критическое значение для работы резервной ступени дистанционной защиты фидеров контактной сети имеет изменение параметров  $\mathbf{F}$  и  $\mathbf{M}$ . Так, если  $\mathbf{F} \rightarrow \min$  (пакетный график движения), а  $\mathbf{M} \rightarrow \max$  (пропуск тяжеловесных поездов), то состояние вектора  $\mathbf{O}_{\Pi_{\text{н}}}(t)$  изменяется таким образом, что он принимает значение  $\mathbf{O}_{\Pi_{\text{н}}}(t) = \sup \mathbf{O}_{\Pi_{\text{н}}}(t)$  и начинает стремиться к области  $\mathbf{O}_{\Pi_{\text{к}}}(t)$ .

Если при этом вектор  $\mathbf{O}_{\Pi_{\text{к}}}(t)$  принимает значение  $\mathbf{O}_{\Pi_{\text{к}}}(t) = \inf \mathbf{O}_{\Pi_{\text{к}}}(t)$ , то  $\mathbf{O}_{\Pi_{\text{н}}}(t) \cap \mathbf{O}_{\Pi_{\text{к}}}(t)$ , что резко повышает возможность ложных срабатываний и как следствие неселективной работы резервной ступени дистанционной защиты.

Негативное влияние на работу третьей ступени НДЗ ФКС проявляется в снижении надежности в работе защиты, проявляющейся в виде увеличения количества неселективных срабатываний.

Данное утверждение можно проиллюстрировать анализом количества отключений за 2018 и 2019 годы по Забайкальской железной дороге, представленных на рисунках 1 и 2.

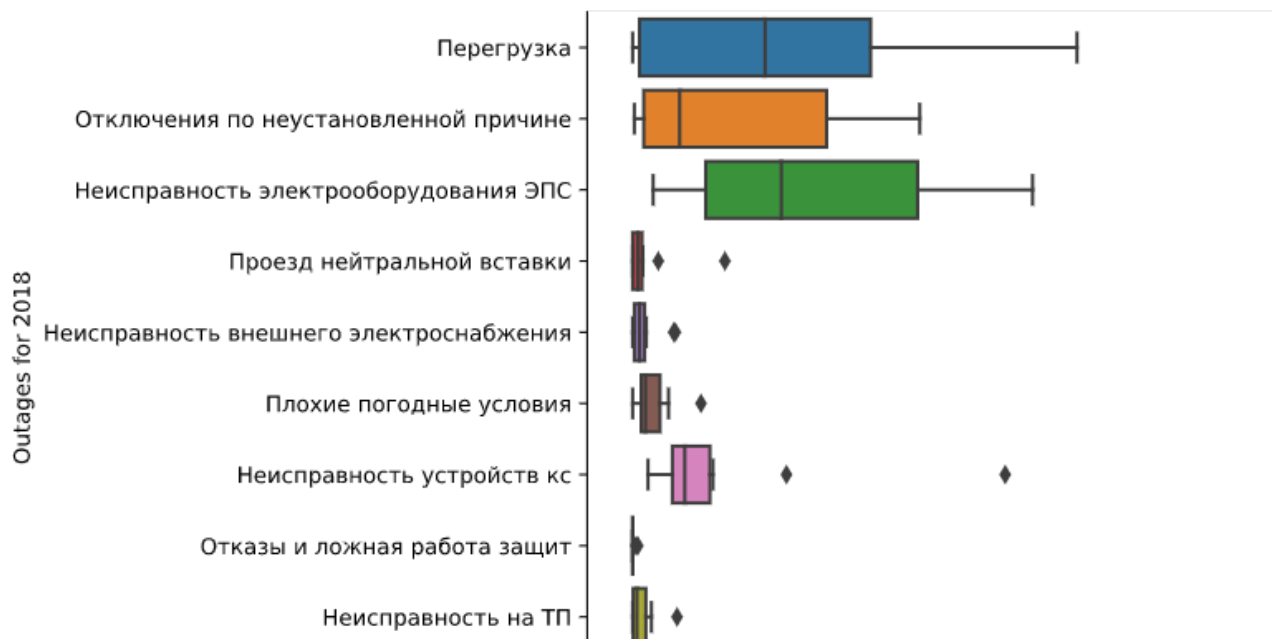


Рисунок 1. Статистика отключений релейной защиты на Забайкальской железной дороге за 2018 год

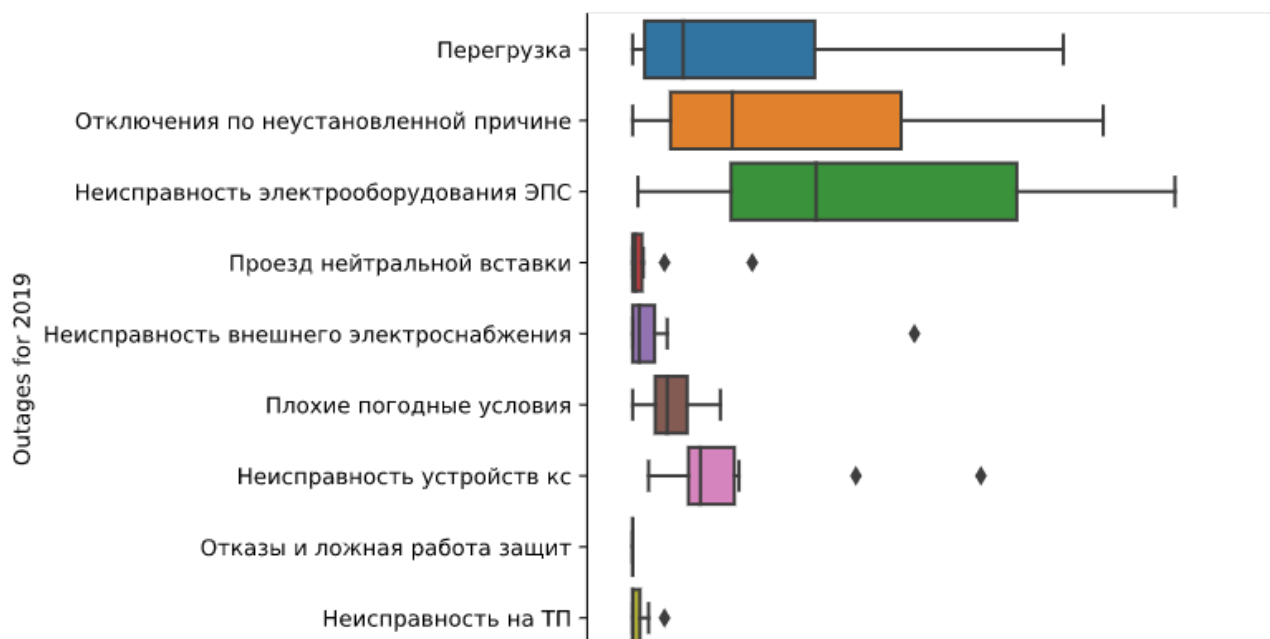


Рисунок 2. Статистика отключений релейной защиты на Забайкальской железной дороге за 2019 год

На рисунках 1 и 2 представлено суммарное количество срабатываний защит фидеров контактной сети по видам отключений для всех дистанций электроснабжения Забайкальской железной дороги. Анализ диаграмм показывает, что наибольшее количество срабатываний защит наблюдается по следующим видам отключений:

- неустановленная причина;
- неисправность электрооборудования ЭПС;
- перегрузка.

Результаты расчета мер центральной тенденции для частых видов отключений за 2018 и 2019 годы в целом для Забайкальской железной дороги представлены в таблице 1.

**Таблица 1.** Меры центральной тенденции для наиболее частых видов отключений за 2018 \ 2019 годы

| Меры центральной тенденции | Перегрузка<br>2018\2019 | Отключения по<br>неустановленной причине<br>2018\2019 | Неисправность<br>электрооборудования ЭПС<br>2018\2019 |
|----------------------------|-------------------------|---|---|
| <b>Mean</b>                | 94.00 \ 47.50           | 95.80 \ 79.80   | 104.70 \ 86.8   |
| <b>Standard deviation</b>  | 101.24 \ 60.11          | 163.97 \ 107.67                                       | 78.48 \ 72.26   |
| <b>min</b>                 | 0.00 \ 00.00            | 1.00 \ 0.00   | 12.00 \ 2.00  |
| <b>25%</b>                 | 4.00 \ 4.50             | 6.50 \ 14.25  | 42.75 \ 37.00   |
| <b>50%</b>                 | 77.50 \ 19.00           | 27.50 \ 37.50   | 87.00 \ 69.00   |
| <b>75%</b>                 | 139.25 \ 68.50          | 113.50 \ 101.00                                       | 166.75 \ 144.50                                       |
| <b>max</b>                 | 260.00 \ 162.00         | 532.00 \ 342.00                                       | 234.00 \ 204.00                                       |

Анализ таблицы показывает, что в целом за 2019 год по обозначенным показателям наблюдается снижение общего количества отключений по сравнению с 2018 годом, однако их количество по-прежнему остается значимым, т.к. факт каждого отключения несет в себе риск для надежности и бесперебойности перевозочного процесса. Также необходимо уточнить, что для ряда тяговых подстанций ситуация имеет более критичный характер, на что, в частности, указывает значительная величина стандартного отклонения и как следствие сильного разброса

значений отключений относительно среднего значения, а также наличие выбросов, указанных в виде отдельных точек на рисунках 1 и 2.

Подобная ситуация во многом обусловлена тем, что после перехода на микропроцессорную базу для реализации терминалов НДЗ ФКС сами алгоритмы, заложенные в основу защиты остались неизменными.

Фундаментальным недостатком данных алгоритмов является то, что они не позволяют однозначно разграничить нормальный и аварийный режимы работы системы при движении поездов повышенной массы. На момент разработки алгоритмов они показывали значительное повышение надежности СТЭ при нормативах весов и интервалах обычного грузового движения. Однако в современных условиях они не обеспечивают должного уровня надежности, что подтверждается статистикой отключений.

Современная микропроцессорная элементная база позволяет использовать широкий спектр возможностей в применении новых подходов к разработке алгоритмов дистанционных защит. Первым шагом при разработке новых алгоритмов и в целом повышении технического совершенства релейной защиты фидеров контактной сети является понимание процессов, происходящих в системе тягового электроснабжения при пропуске поездов повышенной массы.

С этой целью на тяговой подстанции «Сохондо» Забайкальской железной дороги выполнены экспериментальные замеры показателей качества электрической энергии фидера контактной сети № 4 (ФКС-4). Целью данной статьи является анализ результатов замеров с целью понимания процессов и характера изменения величин при пропуске поездов повышенной массы.

## 2. Описание условий и результатов замеров

Экспериментальные замеры проводились на ФКС-4 тяговой подстанции «Сохондо» Забайкальской железной дороги, с помощью анализатора качества электрической энергии RQM-700 от фирмы Sonel.

Тяговая подстанция «Сохондо» по своему типу является транзитной подстанцией. Выбор фидера для установки анализатора качества обусловлен тем, что при пропуске поездов повышенной массы на нем наблюдаются регулярные ложные срабатывания третьей ступени НДЗ ФКС. Согласно отчету подстанции, за 2019 год наибольшее количество отключений на четвертом фидере составило 89 отключений, что на 33% больше, чем 2018 году.

На данном фидере установлен микропроцессорный терминал защиты ЦЗА-27,5 кВ, оснащенный всеми необходимыми типами защит согласно действующих норм и правил [2].

Замеры проводились в период с 2020-09-08 04:22:49.242 по 2020-09-19 18:03:11.715, что составило общую продолжительность в 1 неделю, 4 дня, 13 часов, 40 минут и 22 секунды.

Измерялись параметры согласно [3] в количестве 14 штук. Частота дискретизации замеров составляла 1 секунду.

Для дальнейшего исследования отобраны параметры, представляющие интерес с точки зрения работы НДЗ ФКС как для анализа текущих алгоритмов, так и для разработки новых подходов:

- $U$  - действующее значение напряжения, кВ;
- $I$  - действующее значение тока, А;
- $CF_U$  и  $CF_I$  - коэффициенты пиковой амплитуды напряжения и тока;
- $THD_U$  и  $THD_I$  - коэффициенты гармонических искажений напряжения и тока;
- $U_{hx}$  и  $I_{hx}$  - гармоники напряжения и тока, кВ и А;
- $\cos(\varphi)$  - коэффициент сдвига фаз.

Итоговая форма набора данных для исследования составила 89 переменных и 999610 наблюдений, общее количество значений 88965290. Пропущенных и дублирующих значений нет.

## 3. Анализ мер центральной тенденции

Перед выполнением дальнейшего анализа данных необходимо обозначить вторичные контролируемые параметры НДЗ ФКС, которые не измеряются напрямую анализатором качества, но были дополнительно рассчитаны.

Защита осуществляет расчет вторичных контролируемых уставочных параметров в виде:

$$\mathbf{Z}(nT) = [\mathbf{U}(nT), \mathbf{I}(nT), \boldsymbol{\varphi}_Z]^T = \frac{\mathbf{U}(nT)}{\mathbf{I}(nT)} \quad (6)$$

$$\boldsymbol{\varphi}_Z = \arg[\mathbf{Z}(nT)] = \arg\left[\frac{\mathbf{U}(nT)}{\mathbf{I}(nT)}\right] \quad (7)$$

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^9 \mathbf{I}_h^2(nT)}}{\mathbf{I}(nT)} \cdot 100\%, \quad (8)$$

где  $\mathbf{Z}(nT)$  – m-мерная вектор-функция, характеризующая сопротивление защищаемого фидера;

$\boldsymbol{\varphi}_Z$  – m-мерный вектор, определяющий угол сопротивления;

$\mathbf{U}(nT)$  и  $\mathbf{I}(nT)$  – дискретные значения вектор-функции напряжения и тока после фильтрации;

$THD_I$  – коэффициент гармоник тока фидера;

$n$  – количество выборок;

$T$  – период дискретизации.

Результаты расчета мер центральной тенденции измеренных параметров представлены в таблице 2.

**Таблица 2.** Результаты расчета мер центральной тенденции

| Меры<br>центральной<br>тенденции | $U, \text{кВ}$ | $I, \text{А}$ | $CF_U$ | $CF_I$ | $THD_U$ | $THD_I$ | $\cos(\varphi)$ | $Z, \text{Ом}$ | $\varphi, \text{град}$ |
|----------------------------------|----------------|---------------|--------|--------|---------|---------|-----------------|----------------|------------------------|
| <b>Mean</b>                      | 25.15          | 355.06        | 1.59   | 1.59   | 13.51   | 24.11   | 0.47            | 135.28         | 25.15                  |
| <b>Standard deviation</b>        | 0.57           | 186.71        | 0.06   | 0.26   | 3.36    | 10.18   | 0.27            | 259.60         | 0.57                   |
| <b>min</b>                       | 21.93          | 5.59          | 1.42   | 1.25   | 2.80    | 8.08    | -1.00           | 22.41          | 21.93                  |
| <b>25%</b>                       | 24.79          | 209.57        | 1.55   | 1.43   | 11.15   | 19.91   | 0.42            | 50.90          | 24.79                  |
| <b>50%</b>                       | 25.18          | 339.52        | 1.59   | 1.52   | 13.50   | 22.37   | 0.55            | 74.06          | 25.18                  |
| <b>75%</b>                       | 25.57          | 488.85        | 1.63   | 1.66   | 15.95   | 25.73   | 0.62            | 121.31         | 25.57                  |
| <b>max</b>                       | 26.74          | 1033.10       | 1.97   | 5.95   | 26.22   | 327.67  | 1.00            | 4557.87        | 26.74                  |
| <b>Смещение</b>                  | -0.42          | 0.33          | 0.63   | 2.89   | -0.03   | 10.94   | -2.23           | 7.03           | -0.42                  |
| <b>Эксцесс</b>                   | 0.39           | -0.52         | 0.90   | 12.23  | -0.39   | 208.23  | 5.91            | 58.52          | 0.39                   |

Анализ описательных статистик действующего значения напряжения ФКС-4 ТП «Сохондо» показывает, что среднее значение равное 25.15 кВ имеет значение практически равное номинальному действующему значению, регламентируемому [3] и равному 25 кВ.

Стандартное отклонение равное 0.57 указывает на то, что значения имеют незначительный разброс относительно среднего, также это подтверждает значение медианы или 50% процентиля равного 25.18 кВ. Эксцесс имеет значение равное 0.39, что указывает на «острое» распределение значений напряжения, при этом наблюдаем незначительное отрицательное смещение -0.42 указывающее на то, что в целом значения смещены в большую сторону. С точки зрения работы НЗД ФКС интерес представляет минимальное значение напряжение равное 21.93 кВ, которое приближенно к минимально допустимому значению, регламентируемому [3]. На рисунке 3 представлены диаграмма распределения в виде скрипичного графика (слева) и функция распределения (справа) значений напряжения, иллюстрирующая вышеуказанные выводы.

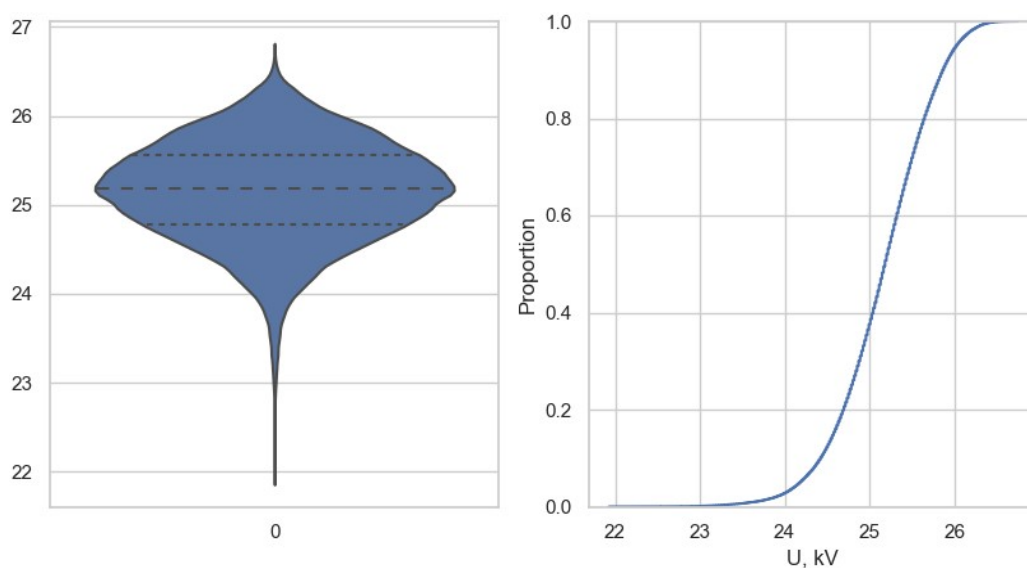


Рисунок 3. Скрипичный график и график функции распределения напряжения

Анализ описательных статистик графиков распределения действующего значения тока, представленных на рисунке 4, показывает, что среднее значение тока равное 355.06 А в целом характерно для нормального режима в условиях организации грузового движения. Однако стандартное отклонение равное 186.71 А указывает на то, что значения тока имеют значительный разброс относительно среднего. Медианное значение равное 339.52 А незначительно отличается от среднего, что указывает на смещение влево относительно среднего, также это подтверждается величиной асимметрии равной 0.33.



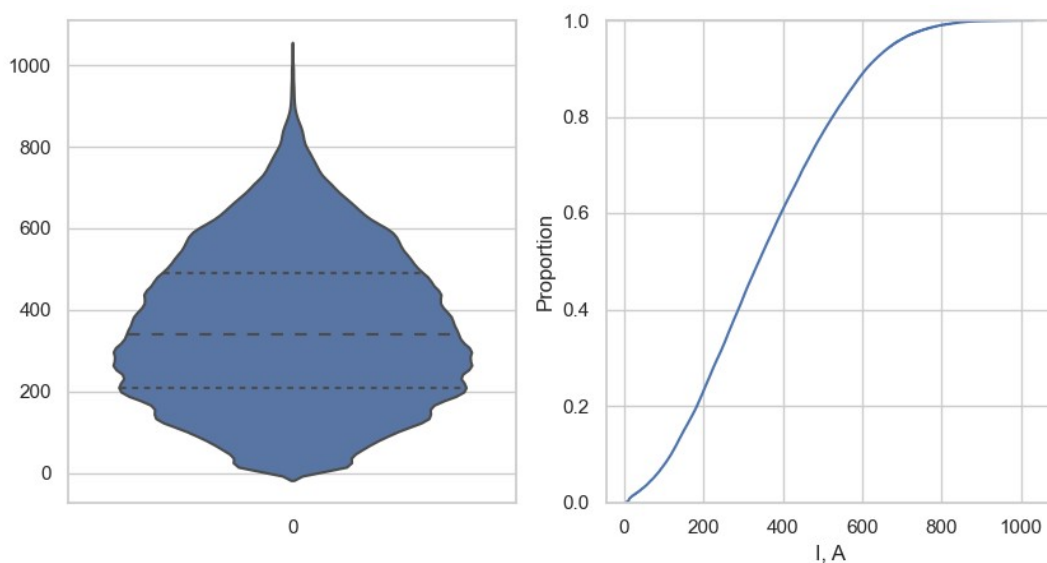


Рисунок 4. Распределение тока

На рисунке 5 представлено распределение значений коэффициента пиковых значений напряжения. Анализ мер центральной тенденции показывает, что среднее значение равно 1.59, что достаточно близко к нормальному значению синусоидального сигнала равному 1.414, однако из переменного характера нагрузки и ряда других факторов, характерных для системы тягового электроснабжения, имеются значительные искажения напряжения, что хорошо видно по форме графика функции распределения. Стандартное отклонение равно 0.06, что в целом указывает на незначительный разброс значений относительно среднего, также это подтверждается тем, что значение медианы совпадает со значением среднего. Данные имеют нормальное распределение с небольшим смещением в сторону меньших значений т.к. значение смещения положительно и равно 0.63. Значение эксцесса коэффициента пиковой амплитуды напряжения равно 0.90, что указывает на наличие «острой» вершины распределения, также это подтверждается скрипичным графиком на рисунке 5.

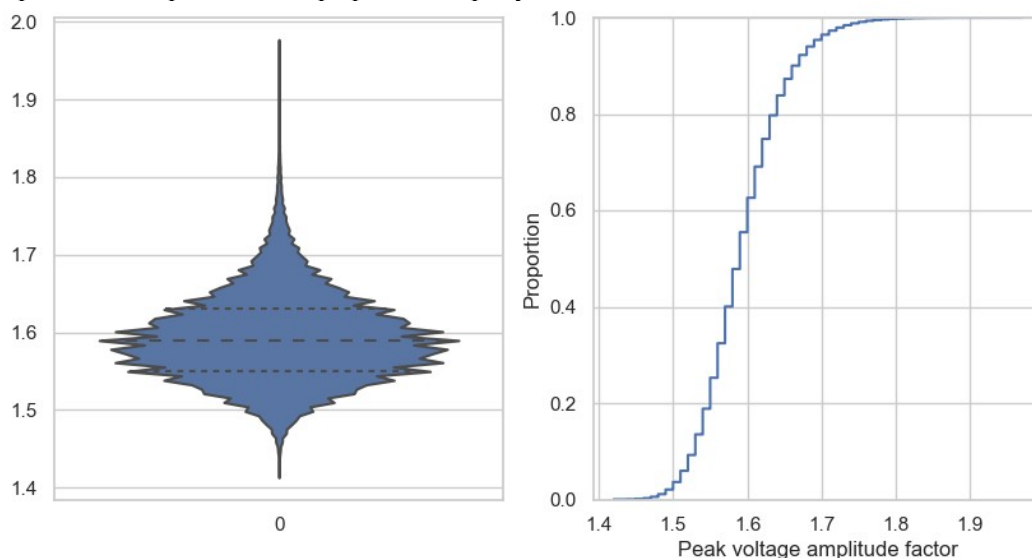


Рисунок 5. Распределение коэффициента пиковой амплитуды напряжения

Распределение коэффициента пиковой амплитуды тока представлено на рисунке 6. Совместный анализ таблицы 2 показывает, что, как и напряжение, ток в среднем имеет форму, близкую к идеальной синусоиде, т.к. среднее значение аналогично значению коэффициента пиковой амплитуды напряжения и равно 1.59. Однако наблюдается значительно большее стандартное отклонение, равное 0.26, что указывает на смещение значений относительно среднего, также это подтверждается тем, что медиана отличается от среднего и равна 1.52. Значительная положительная величина асимметрии, равная 2.89 указывает на сдвиг распределения в сторону меньших значений, при этом сама величина смещения намного больше 1, что говорит о распределении данных по форме отличной от нормального. Максимальное значение коэффициента пиковой амплитуды тока составляет 5.95, а эксцесс имеет значение равное 12.23, что говорит о значительных пиковых значениях тока, составляющих примерно 5 – 8 % от общего числа наблюдений согласно графику функции распределения.

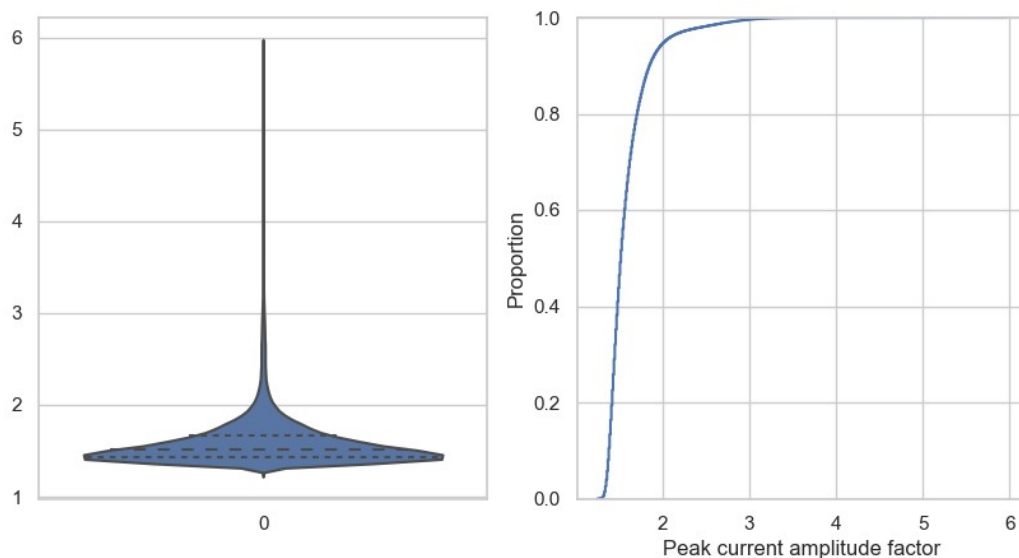


Рисунок 6. Распределение коэффициента пиковой амплитуды тока

На рисунке 7 представлено распределение коэффициента гармонических искажений напряжения для основной гармоники 50 Гц. Среднее значение равно 13.51, что указывает на значительное присутствие высших гармонических составляющих в сигнале напряжения, что в целом является значимым фактором с точки зрения работы НДЗ ФКС, т.к. искажения сигнала в значительной степени влияют как на результаты замеров, так и на работу защиты. Стандартное отклонение равно 3.36, что указывает на незначительное смещение наблюдений относительно среднего, что дополнительно подтверждается тем, что медианное значение практически равно среднему и составляет 13.50. Максимальное значение коэффициента гармонических искажений напряжения равно 26.22, что указывает на значительное искажение формы сигнала, при этом число подобных наблюдений согласно графику функции распределения, составляет от 3 до 5 % от общего числа наблюдений. Значение смещения составляет -0.03, а значение эксцесса -0.39, что указывает на распределение данных близкое к нормальному.

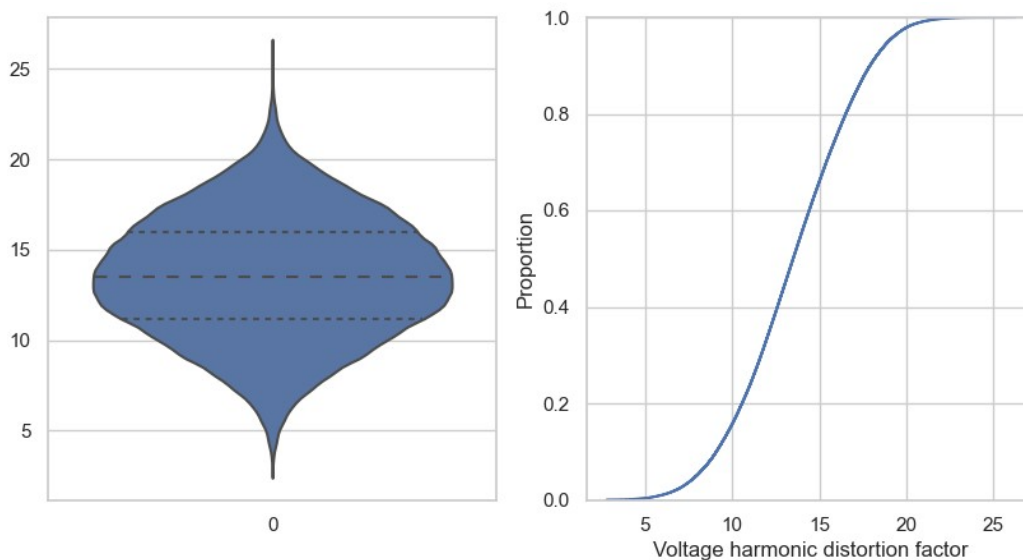


Рисунок 7. Распределение коэффициента гармонических искажений напряжения

Распределение коэффициента гармонических искажений тока представлено на рисунке 8. Анализ показывает, что среднее значение коэффициента равно 24.11, что говорит о еще большем загрязнении сигнала тока высшими гармоническими составляющим по сравнению с напряжением. Данное обстоятельство также крайне негативно влияет на работу НДЗ ФКС. Медиана равная 22.37 указывает на смещение значений влево относительно среднего, при этом величина асимметрии составляет 10.94, что говорит о сильном смещении в сторону меньших значений и то, что форма распределения данных не является нормальной. Значительное значение эксцесса равное 208.23 указывает на то, что форма распределения имеет значительную острую вершину и длинные хвосты. Анализ скрипичного графика показывает, что правый хвост распределения имеет значительную величину из-за относительно редких тяжеловесных поездов по отношению к числу поездов других типов. Максимальное значение коэффициента гармонических искажений тока имеет 327.67 и количество подобных наблюдений составляют от 3 до 5 % от общего числа наблюдений, что в целом характерно для поездов повышенной массы. Столь высокое максимальное значение коэффициента говорит о том, что при пропуске тяжеловесных поездов форма тока в значительной степени искажена.

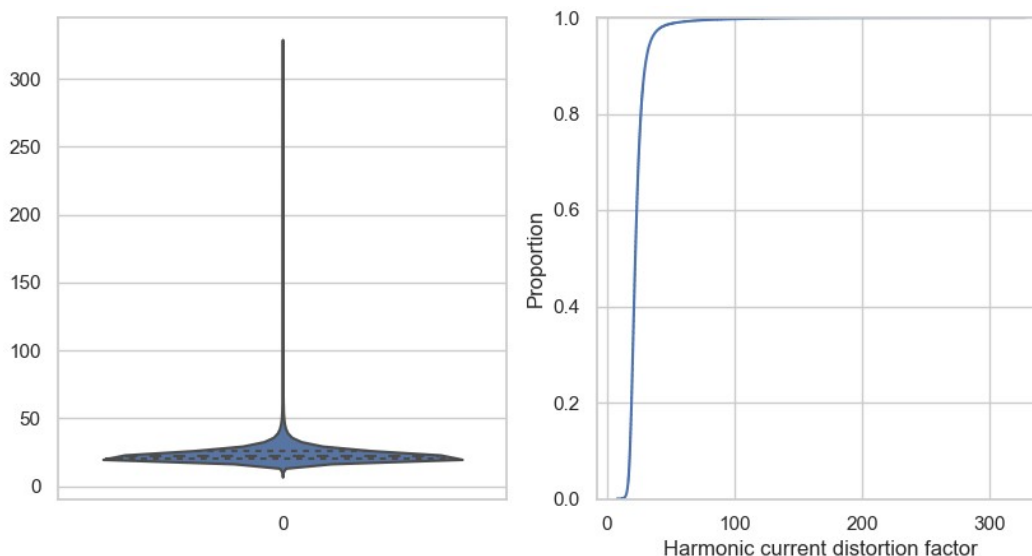


Рисунок 8. Распределение коэффициента гармонических искажений тока

На рисунке 9 представлено распределение коэффициента сдвига фаз. Среднее значение коэффициента равно 0.47, что указывает в целом на неудовлетворительное качество электрической энергии. Медианное значение равно 0.55, что говорит о смещении наблюдений относительно среднего значения в сторону больших значений. Минимальное и максимальное значения изменяются от -1 до 1, что говорит об изменении характера нагрузки от емкостной до индуктивной. При этом большая часть нагрузки согласно графику функции распределения имеет индуктивный характер и длинный хвост в сторону емкостной нагрузки. С точки зрения работы НДЗ ФКС данное обстоятельство является осложняющим фактором т.к. может привести к искажению дистанционных замеров и как следствие к отказам или ложным срабатываниям защиты. Отрицательное смещение равно -2.23 указывает на сдвиг в сторону больших значений, а высокое значение эксцесса равно 5.91 говорит, что по краям распределения находится больше значений, чем вокруг среднего.

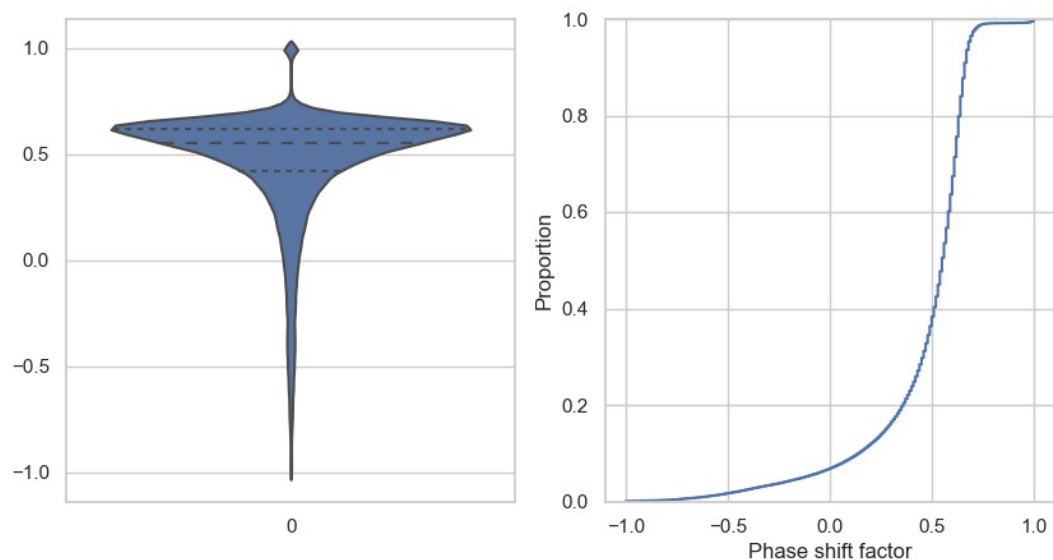


Рисунок 9. Распределение коэффициента сдвига фаз

Распределение сопротивления нагрузки представлено на рисунке 10. Среднее значение равно 135.28 Ом, что в целом нормально для грузового движения, т.к. согласно [4, 6] к нормальному режиму по критерию сопротивления относятся значения  $Z > 30$  Ом. Стандартное отклонение равно 259.60 Ом указывает на то, что значения сильно смещены относительно среднего, что также подтверждается формой скрипичного графика и значительным отличием медианы от среднего значения равного 74.06 Ом. Минимальное значение сопротивления составило 22.41 Ом, что согласно критериям граничных условий, представленных в [4] говорит о значениях нагрузки при пропуске тяжеловесных поездов повышенной массы имеет значение ниже границы принятого нормального режима. Максимальное значение сопротивления нагрузки равно 4557.87 Ом образовано от минимального значения тока 5.59 А, что говорит о возможном наличии уравнильных токов на исследуемой межподстанционной зоне, что также является осложняющим фактором для НДЗ ФКС. Значительное положительное значение асимметрии равно 7.03 Ом говорит о сдвиге распределения в сторону меньших значений. Значение эксцесса сопротивление равно 58.52 Ом указывает на наличие длинных хвостов, т.е. что по краям распределения находится больше значений, чем вокруг среднего.

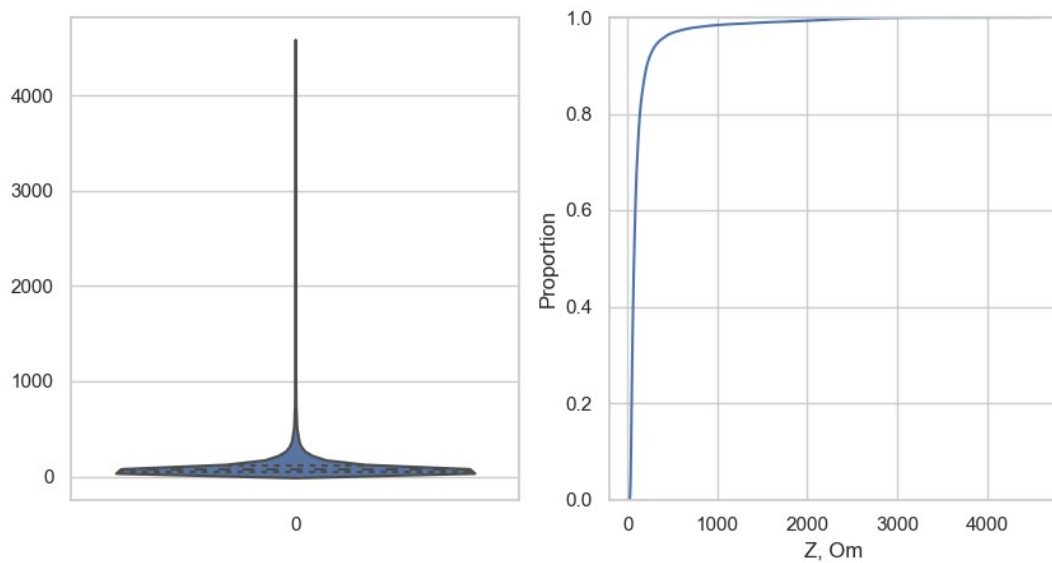


Рисунок 10. Распределение сопротивления нагрузки

На рисунке 11 представлено распределение угла между первыми гармониками напряжения на шинах подстанции и током фидера. Среднее значение угла составляет  $25.15^\circ$ , что с точки зрения НДЗ ФКС является положительным фактором, т.к. согласно [4] граничным условием по углу является значения  $\varphi < 40^\circ$ . Относительно незначительная величина стандартного отклонения равная 0.57, а также практически совпадающее со средним значение медианы равное 25.18 и отрицательное значение асимметрии равное -0.42 указывают на незначительный разброс значений относительно среднего и их смещение в сторону больших значений. Положительное значение эксцесса угла равное 0.39 указывает на острую форму распределения, что подтверждается формой скрипичного графика.

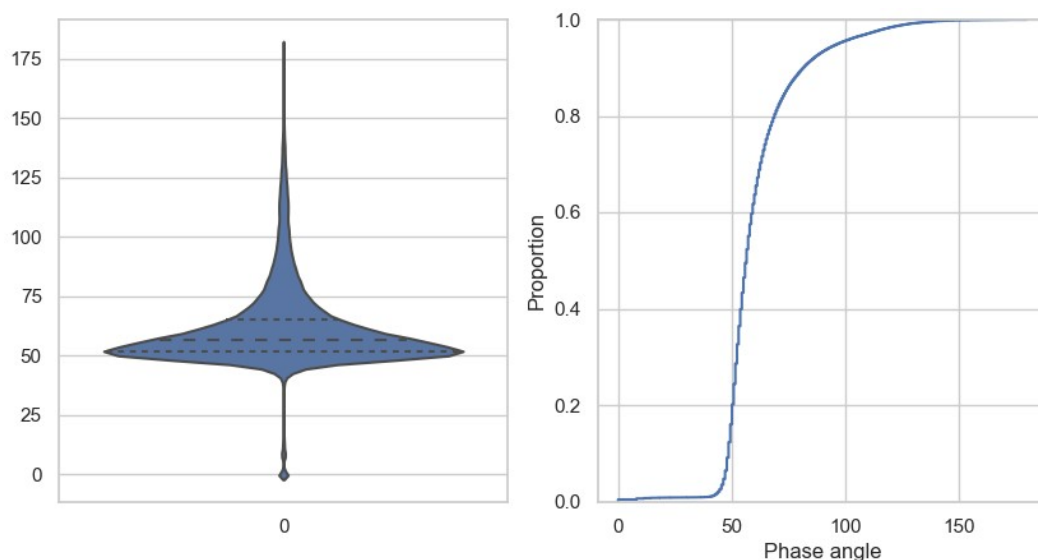


Рисунок 11. Распределение фазового угла между первыми гармониками напряжения на шинах подстанции и током фидера.

#### 4. Заключение

В данной работе выполнено исследование основных мер центральной тенденции параметров, контролируемых релейной защитой фидеров контактной сети при организации движения поездов повышенной массы на примере четвертого фидера контактной сети тяговой подстанции «Сохондо» Забайкальской железной дороги.

Результаты исследования подтверждают гипотезу авторов о том, что при организации движения повышенной массы на регулярной основе наблюдается снижение напряжения в фидере контактной сети к граничным значениям минимально допустимого значения, регламентируемого [3], что представлено в виде хвоста с диапазоном значений от 23 до 22 кВ и ниже на рисунке 3.

При этом значения тока фидера также стремятся к максимально допустимым значениям и выходят за границы нормального режима, равного 850 А, указанного в [4]. Данный факт представлен в виде хвоста распределения значения тока на рисунке 4.

Организация движения повышенной массы не лучшим образом сказывается на качестве электрической энергии и приводит к значительным искажениям формы сигнала тока и напряжения, что подтверждается высокими значениями коэффициентов пиковой амплитуды в своем максимуме, достигающих 1.97 и 5.95 для напряжения и тока соответственно. При пропуске поездов повышенной массы наблюдается сильное «загрязнение» тяговой сети высшими гармоническим составляющим, что подтверждается высокими значениями коэффициентов гармонических искажений напряжения и тока в своем максимуме достигающих значений 26.22 и 327.67 соответственно. Отдельно стоит отметить крайне низкое среднее значение, что в целом указывает неудовлетворительное качество электрической энергии. Вышеуказанные факты крайне негативным образом сказываются на качестве и точности работы НДЗ ФКС и как следствие на надежность перевозочного процесса в целом.

Анализ и оценка распределения сопротивления нагрузки и угла между первыми гармониками напряжения на шинах подстанции и током фидера подтверждает гипотезу авторов, о том, что при организации движения поездов повышенной массы наблюдается перекрытие зон нормального и аварийного режимов, что вносит неоднозначность в оценку режима НДЗ ФКС и как следствие приводит к увеличению числа срабатываний защит по перегрузке и неизвестным причинам.

Общие итоги анализа в целом подтверждают ключевой тезис авторов, о том, что с одной стороны текущая элементная база позволяет реализовывать принципиально новые алгоритмы защиты, но используемые сегодня во многом классические подходы: во-первых не реализуют весь потенциал текущей элементной базы, а во-вторых не позволяют однозначно разграничить нормальный и аварийный режим работы и как следствие невыполнение ключевых требований, предъявляемых к релейной защите в виде селективности, надежности и устойчивости.

## **5. Благодарности**

Коллектив авторов выражает глубокую благодарность заместителю начальника Забайкальской дирекции по энергообеспечению по тяговым подстанциям и технологическим сетям – структурного подразделения «Трансэнерго2 – филиала ОАО «РЖД» Янкину Денису Юрьевичу за всестороннюю помощь и содействие в организации и проведении экспериментальных замеров на действующих подстанциях Забайкальской железной дороги.

## **6. References**

- [1] Стратегия развития холдинга "РЖД" на период до 2030 года, утверждена протоколом Совета Директоров ОАО "РЖД" от 23.12.13 №19
- [2] СТО РЖД 07.021.1-2015 Защита систем электроснабжения железной дороги от коротких замыканий и перегрузки, часть 1. Общие принципы и правила построения защит, блокировок и автоматики в системах тягового электроснабжения, утвержден распоряжением ОАО «РЖД» от 27.05.2015 г. №1351р

- [3] ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартиформ, 2014 г. – 20с.
- [4] СТО РЖД 07.021.5-2018 Защита систем электроснабжения железной дороги от коротких замыканий и перегрузки, часть 4. Методика выбора уставок защит в системе тягового электроснабжения переменного тока, утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от 07.04.2016 г. №615р
- [5] Трифонов Р. С. Повышение селективности резервной ступени дистанционной защиты фидеров контактной сети на основе адаптивной идентификации: автореф. дис ... канд. Техн. наук: 05.22.07 / Трифонов Руслан Сергеевич. - Чита, 2015. - 187 с.
- [6] Фигурнов Е.П. Релейная защита: учебник. В 2-х ч. Ч.2. 3-е изд., перераб. и доп. / Е.П. Фигурнов. – М.: ГОУ Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2009. – 604 с.