

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИЗМЕРЕНИЯ А-ПАРАМЕТРОВ ЭКВИВАЛЕНТНОГО ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКА ПУТЕВОГО ФИЛЬТРА ТОНАЛЬНОЙ РЕЛЬСОВОЙ ЦЕПИ

ЮСУПОВ Руслан Рифович¹, кандидат техн. наук, доцент, доцент кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте»; e-mail: r.iusupov@samgups.ru

ХОХРИН Алексей Сергеевич¹, кандидат техн. наук, доцент кафедры «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте»; e-mail: a.hohrin@samgups.ru

ЩЕРБИНА Евгений Геннадьевич², кандидат техн. наук, доцент, технический директор; e-mail: evgeny.shcherbina@1520signal.ru

ЩЕРБИНА Алексей Евгеньевич², кандидат техн. наук, начальник отдела рельсовых цепей; e-mail: alexey.shcherbina@1520signal.ru

ПАВЛОВ Евгений Владимирович³, кандидат техн. наук, первый заместитель генерального директора; e-mail: ev.pavlov@elteza.ru

¹ ФГБОУ ВО «Приволжский государственный университет путей сообщения», Самара

² ООО «1520 Сигнал», Москва

³ АО «Объединенные электротехнические заводы» (АО «ЭЛТЕЗА»), Москва

При разработке и последующей актуализации цифровых двойников тональных рельсовых цепей возникает необходимость измерения А-параметров (коэффициентов A , B , C , D) эквивалентных четырехполюсников аппаратуры, входящей в состав конкретной рельсовой цепи. Измерение А-параметров четырехполюсника путевого фильтра ФПМ, применяемого в тональных рельсовых цепях, осложняется нелинейностью входящего в состав ФПМ трансформатора, приводящей к зависимости этих параметров от напряжения на входе ФПМ. Рассмотрены применяемые в настоящее время методы измерения А-параметров линейных четырехполюсников. Представлены аспекты практической реализации предложенной ранее авторами методики измерения А-параметров четырехполюсника ФПМ, учитывающей нелинейность трансформатора ФПМ посредством измерений в конкретной рабочей точке ФПМ, под которой понимается заданное значение напряжения на его входе. Выполнена реализация методики для фильтра ФПМ 8, 9, 11, настроенного на частоту несущей 480 Гц при значении входного напряжения ФПМ 3,3 В. Рассчитана матрица коэффициентов четырехполюсника ФПМ. Выполнены проверки правильности измерений. Относительная погрешность модуля и аргумента входного сопротивления трансформатора, модулей и фаз входного тока и напряжения трансформатора, входного тока и напряжения ФПМ не превысила по абсолютной величине 1%. Использование методов измерения А-параметров линейных четырехполюсников в режимах холостого хода и короткого замыкания вследствие нелинейности трансформатора ФПМ может привести к некорректности получаемых значений параметров четырехполюсника ФПМ. Рассмотренная в статье на конкретном практическом примере методика измерения А-параметров четырехполюсника ФПМ позволяет определять значения параметров четырехполюсника ФПМ с точностью, приемлемой для использования в расчетах регулировочных характеристик рельсовых цепей.

Ключевые слова: цифровой двойник, тональная рельсовая цепь, фильтр путевого, метод трех известных нагрузок, методика измерения, рабочая точка, точность математической модели

DOI: 10.20295/2412-9186-2026-12-02-89-113

▼ Введение

Цифровая трансформация хозяйства железнодорожной автоматики и телемеханики ставит задачу массового внедрения цифровых двойников эксплуатируемых и перспективных устройств [1]. В современных микропроцессорных системах управления движением поездов вопросы цифровизации неразрывно связаны

с проблемой обеспечения безопасности движения поездов [2]. Важнейшую роль в обеспечении безопасности движения поездов на железных дорогах России играют электрические рельсовые цепи (РЦ). Необходимость контроля их состояния и обеспечения эффективной работы ставит задачи массового внедрения и практического применения их цифровых

двойников. Актуальной также становится задача теоретической и практической подготовки соответствующих специалистов, способных решать данные вопросы.

В практике решения задач анализа и синтеза РЦ широко используются их математические модели в виде соединенных между собой четырехполюсников (ЧП), замещающих элементы РЦ [3, 4]. Каждый ЧП характеризуется системой параметров, описывающих взаимосвязь входных и выходных величин (токов и напряжений) элемента РЦ. Разработка и поддержание в актуальном состоянии цифровых двойников РЦ сопряжены с рядом трудностей, обусловленных зависимостью параметров ЧП от множества факторов. Так, значения A -параметров (коэффициентов A , B , C , D) ЧП путевого фильтра ФПМ, являющегося элементом современных тональных РЦ (ТРЦ), зависят от частоты f_n несущей сигнала ТРЦ, типа ФПМ, настройки и схемы включения ФПМ (сочетания установленных перемычек для настройки в резонанс и используемых выходных контактов), технологического разброса и изменения в процессе эксплуатации значений параметров компонентов ФПМ.

С учетом вышесказанного при разработке и актуализации цифровых двойников ТРЦ возникает необходимость измерения значений A -параметров ЧП конкретных экземпляров ФПМ, применяемых в определенных условиях эксплуатации.

Целью настоящей статьи является анализ теоретических и практических аспектов проблемы измерения A -параметров эквивалентного ЧП путевого фильтра ФПМ и точности математической модели в широком диапазоне рабочих напряжений, а также детальное рассмотрение предложенного авторами ранее варианта ее решения для возможности практической реализации при автоматизации аппаратно-программными средствами. В статье последовательно выполняются следующие задачи:

1. Анализ известных методов измерения A -параметров эквивалентных ЧП в аспекте их применимости к измерению A -параметров ЧП ФПМ.

2. Подробное обоснование практических особенностей предложенной авторами ранее методики измерения A -параметров ЧП ФПМ.

3. Рассмотрение на конкретном примере аспектов практической реализации данной методики, знание и учет которых позволят избежать ошибок и получить корректные результаты измерений.

Методы измерения A -параметров эквивалентных четырехполюсников

Наиболее общим методом определения A -параметров ЧП является метод трех известных нагрузок [5–7]. В зависимости от условий работы четырехполюсника и пределов изменения напряжений и токов нагрузки могут выбираться в пределах по модулю от 0 до ∞ и по аргументу от $+\pi/2$ до $-\pi/2$.

В настоящее время в практике измерения коэффициентов A , B , C , D линейных ЧП применяются следующие методы [6, 8–10]:

- холостого хода (ХХ) и короткого замыкания (КЗ);
- ХХ, КЗ и известной нагрузки;
- непосредственной оценки.

Первые два из перечисленных методов являются вариациями метода трех известных нагрузок для частных случаев граничных значений нагрузок (холостой ход — сопротивление нагрузки равно ∞ , короткое замыкание — сопротивление нагрузки равно 0). В третьем методе также используются режимы ХХ и КЗ четырехполюсника.

Перечисленные выше методы находят применение в том числе и в учебном процессе.

Измерения на граничных значениях нагрузок (0 и ∞) упрощают последующие расчеты, но использование режимов ХХ и КЗ на практике целесообразно только при условии линейности характеристик ЧП. Кроме того, режим КЗ может привести к нагреву обмоток трансформатора и неконтролируемому изменению его параметров, что потребует применения оборудования для охлаждения обмоток и поддержания постоянной температуры в помещении, где проводятся измерения. Режим КЗ также может оказаться неприемлемым для трансформатора по причине выхода токов за предельно допустимые значения.

Реализация режима КЗ требует, кроме того, наличия генератора сигналов достаточной мощности. Практика измерений и расчетов, проведенных авторами, показывает,

что потребная мощность генератора может составлять более 100 Вт. Однако дистанции сигнализации, централизации и блокировки, согласно Регламенту технической и технологической оснащённости¹, а также многие учебно-исследовательские лаборатории вузов, как правило, оснащены генераторами сигналов типа ГЗ-123, ГЗ-121, ГЗ-118 или аналогичными, выходная мощность которых не превышает 10 Вт. Поэтому применение данных методов будет ограничено возможностями (характеристиками) имеющихся в наличии приборов и оборудования.

В работе [11] предлагается методика определения A -параметров ЧП ФПМ, состоящая из нескольких этапов. Сначала ЧП ФПМ разбивается на два каскадно включенных ЧП: конденсатора с резонансной емкостью $C_{рез}$ (в оригинальном тексте использовано обозначение C_{ϕ}) и реального трансформатора. Затем определяются коэффициенты $A_{тр}$, $B_{тр}$, $C_{тр}$, $D_{тр}$ ЧП трансформатора для заданного режима подключения через его входные сопротивления в режимах ХХ и КЗ. Матрица коэффициентов ЧП фильтра определяется выражением

$$\begin{bmatrix} A_{\phi} & B_{\phi} \\ C_{\phi} & D_{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{j\omega C_{рез}} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A_{тр} & B_{тр} \\ C_{тр} & D_{тр} \end{bmatrix}.$$

В развитие данной методики в работе [12] предлагается для измерения входного сопротивления трансформатора в режиме ХХ использовать метод трех вольтметров, а в режиме КЗ — измеритель иммитанса.

Сложность измерения A -параметров ЧП трансформатора ФПМ создает тот факт, что трансформатор является нелинейным элементом. Об этом говорит предварительно снятая зависимость модуля входного сопротивления $Z_{1тр}$ трансформатора от входного напряжения $U_{1тр}$ (рис. 1) в режиме ХХ.

Причина этого — нелинейность индуктивности намагничивания вследствие изменения магнитной проницаемости материала сердечника при изменении напряжений на его обмотках (особенно характерно для трансформаторов, выполненных на сердечниках с минимальным воздушным зазором или без него). Как следствие, нелинейность трансформатора приводит к зависимости A -параметров ЧП ФПМ от напряжения на входе ФПМ. Очевидно, что параметры трансформатора актуальны в диапазоне рабочих напряжений, который в данном случае составляет 5–80 В (выходное напряжение генератора может устанавливаться от 1,3 до 8 В, добротность последовательного колебательного контура в ФПМ — от 4 до 10, откуда и получается указанный диапазон полезного напряжения на входе трансформатора).

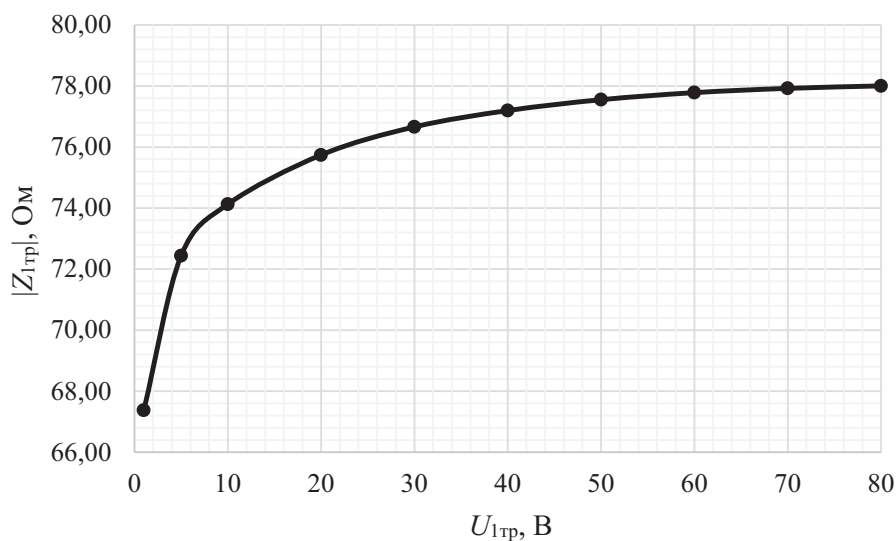


Рис. 1. Входное сопротивление трансформатора в режиме ХХ

¹ Регламент технической и технологической оснащённости дистанций сигнализации, централизации и блокировки — структурных подразделений Центральной дирекции инфраструктуры: утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 20 июля 2015 г. № 1778р. М., 2015. 31 с.

При использовании измерителя иммитанса измерение входного сопротивления трансформатора в режиме КЗ будет осуществляться при напряжении, существенно отличающемся от напряжения на входе трансформатора, действующего в условиях реальной эксплуатации. Так, у измерителя иммитанса Е7-20, которым оснащаются дистанции сигнализации, централизации и блокировки в соответствии с Регламентом технической и технологической оснащённости дистанций сигнализации, централизации и блокировки, напряжение измерительного сигнала составляет от 40 мВ до 1 В, в то время как в реальных условиях напряжение на входе трансформатора может быть значительно выше. Например, при проверке ФПМ в соответствии со схемой, приведенной на рис. 1 в паспорте ФПМ¹ (это одна из возможных схем включения ФПМ в рельсовую цепь), при настройке фильтра в резонанс напряжение на контактах 11-43 ФПМ (выводы входной обмотки трансформатора) должно быть не менее 35 В. Как следствие, полученные с помощью измерителя иммитанса значения A -параметров ЧП ФПМ будут некорректными для сигнала такой величины. Тем более что, как видно по графику на рис. 1, нелинейность характеристики при напряжении ниже 5 В выше, чем при более высоком напряжении.

Выбору и разработке (и тем более применению, реализации в аппаратно-программном комплексе) метода измерений параметров должна предшествовать идентификация пассивного элемента электрической цепи по признаку линейности. Игнорирование этого правила может привести к ложным результатам и опасным в системе обеспечения безопасности движения поездов последствиям.

Методика измерения A -параметров эквивалентного четырехполюсника ФПМ

Как было отмечено выше, нелинейность расположенного в ФПМ трансформатора приводит к зависимости A -параметров ЧП ФПМ от напряжения на входе ФПМ. По-

этому использование трех вышеперечисленных методов на практике не позволяет получить правильные и соответствующие конкретным условиям эксплуатации значения A -параметров ЧП ФПМ.

Для решения данной задачи измерение A -параметров необходимо производить при определенном (заранее заданном, например, в соответствии с регулировочной таблицей ТРЦ) значении напряжения на входе ФПМ (назовем это значение условно **рабочей точкой (РТ) ФПМ**).

В [13] авторами была предложена методика измерения A -параметров эквивалентного ЧП ФПМ, отличительными особенностями которой являются, во-первых, адаптация применительно к ФПМ метода определения параметров эквивалентного ЧП дроссель-трансформатора, представленного в [5], а во-вторых, совокупность качественных и количественных проверок, позволяющих сделать обоснованный вывод о правильности измеренных значений A -параметров ЧП ФПМ и, соответственно, адекватности полученных математических моделей. В предложенной методике, учитывая нелинейность трансформатора ФПМ, измерение A -параметров ЧП ФПМ осуществляется в конкретной РТ ФПМ, что делает возможным применение линейной модели в данной точке. Режимы ХХ и КЗ не используются. Реализация этой методики в части расчетов по данным измерений была выполнена в виде программы «Расчет A -параметров четырехполюсника фильтра путевого ФПМ» [14].

Методика состоит из нескольких этапов. Сначала ЧП ФПМ $N_{\text{ФПМ}}$ так же, как и в [11], разбивается на два каскадно соединенных ЧП: N_c — ЧП конденсаторов и $N_{\text{тр}}$ — ЧП трансформатора (рис. 2).

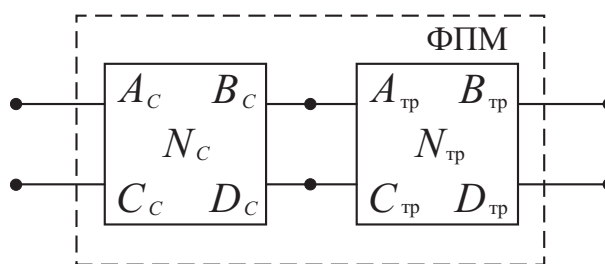


Рис. 2. Представление ЧП ФПМ как двух каскадно соединенных ЧП

¹ Фильтр путевого ФПМ: паспорт 36163-00-00ПС / ЛОЭТЗ — филиал ОАО «ЭЛТЕЗА». М. 7 с.

Далее последовательно выполняются представленные ниже этапы.

Этап 1. Определение РТ трансформатора ФПМ. Исходя из реальных нагрузок трансформатора ФПМ определяются номинальные значения нагрузочных сопротивлений $R_{н1}—R_{н5}$. Их рекомендуется подбирать так, чтобы $R_{н1}$ было приблизительно равно модулю минимального значения сопротивления нагрузки на выходе ФПМ при его включении в конкретную рельсовую цепь, $R_{н3}$ — модулю максимального значения, а $R_{н2} \approx (R_{н1} + R_{н3})/2$. Значения $R_{н4}$ и $R_{н5}$ выбираются произвольно промежуточными между $R_{н1}$ и $R_{н2}$, $R_{н2}$ и $R_{н3}$ соответственно.

Далее в заданной РТ ФПМ измеряется значение напряжения на входе трансформатора ФПМ при подключении к его выходу нагрузочного сопротивления $R_{н2}$. Обозначим это значение напряжения как $U_{РТ,тр}$.

Этап 2. Измерение А-параметров ЧП трансформатора. Измерение осуществляется методом трех известных нагрузок. Суть метода состоит в том, что к выходу ЧП трансформатора поочередно подключают три нагрузочных сопротивления $R_{н1}$, $R_{н2}$, $R_{н3}$. Затем измерениями определяют, в какие значения входных сопротивлений $Z_{1,тр,изм.1}$, $Z_{1,тр,изм.2}$, $Z_{1,тр,изм.3}$ эти сопротивления трансформируются. При этом важно для каждого нагрузочного сопротивления перед измерениями выставлять на входе трансформатора значение напряжения, равное $U_{РТ,тр}$.

Для измерения комплексных входных сопротивлений можно воспользоваться методом косвенной оценки: сначала методом непосредственной оценки измеряются модули входных тока и напряжения трансформатора, их разность фаз, затем модуль комплексного сопротивления определяется как отношение модуля напряжения к модулю тока, а аргумент комплексного сопротивления определяется как разность фаз напряжения и тока. Измерения модулей и фаз входного тока и напряжения можно осуществить измерительным комплексом, состоящим из четырехканального цифрового осциллографа с входной чувствительностью не хуже 1 мВ/дел, дифференциального предусилителя и токовых пробников. При отсутствии такого комплекса можно использовать метод трех вольтметров, описанный в издании [6] на с. 110 и в [12]. Однако в этом

случае погрешность измерения аргументов сопротивлений будет зависеть от соотношения измеряемых напряжений. Так, в [6] (рис. 100 на с. 111) и в [12] также приведен график зависимости погрешности измерения аргумента входного сопротивления от его вычисляемого значения. Кроме того, метод трех вольтметров более трудоемок. Для измерений в одной РТ на одной частоте или на небольшом наборе РТ и частот это не критично. Однако на практике может возникнуть необходимость выполнить измерения в большом количестве РТ и частот, например, на пяти частотах (420, 480, 580, 720 и 780 Гц) сигнального тока самой рельсовой цепи и на четырех частотах (25, 50, 75 и 175 Гц) сигнальных токов автоматической локомотивной сигнализации, а также при шести значениях коэффициента трансформации. В этом случае измерения становятся громоздкими и целесообразно использовать более эффективное по трудозатратам одновременное измерение модулей и фаз токов и напряжений с помощью измерительного комплекса, упоминавшегося выше.

Далее А-параметры ЧП трансформатора определяются в соответствии с выражениями, приведенными в [5].

Этап 3. Определение А-параметров ЧП конденсаторов. Осуществляется путем измерения их емкости $C_{кон}$ измерителем иммитанса и расчета в соответствии с выражением

$$N_C = \begin{bmatrix} A_C & B_C \\ C_C & D_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{2\pi f_n C_{кон}} \cdot e^{-j90^\circ} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где $C_{кон}$ — емкость параллельно соединенных конденсаторов ФПМ в рассматриваемом варианте включения.

Этап 4. Определение А-параметров ЧП ФПМ. Осуществляется перемножением матриц А-параметров ЧП конденсаторов и ЧП трансформатора:

$$N_{ФПМ} = N_C N_{тр}. \quad (2)$$

Этап 5. Проверка адекватности математических моделей эквивалентных ЧП трансформатора ФПМ и ФПМ в целом. Осуществляется ряд качественных и количественных проверок адекватности математических

моделей как отдельного трансформатора, так и ФПМ в целом.

Первичные качественные проверки на отсутствие грубых ошибок при сборке схем и выполнении непосредственно измерений осуществляются путем расчета (через измеренные A -параметры ЧП трансформатора ФПМ) и качественного анализа значений следующих величин:

- 1) модулей и аргументов входных сопротивлений трансформатора со стороны входа ($Z_{1Хтр}$ и $Z_{1Ктр}$) и со стороны выхода ($Z_{2Хтр}$ и $Z_{2Ктр}$) в режимах ХХ и КЗ соответственно;
- 2) характеристических параметров трансформатора.

Для оценки степени адекватности полученных математических моделей в форме эквивалентных ЧП трансформатора ФПМ и всего ФПМ проводятся следующие *количественные проверки* с использованием результатов измерений, выполненных при подключении на выходе ФПМ нагрузок $R_{н4}$ и $R_{н5}$ (в рабочем режиме):

- первая проверка: по модулю и аргументу входного сопротивления трансформатора;
- вторая проверка: по модулю и фазе входного тока трансформатора;
- третья проверка: по модулю и фазе входного напряжения трансформатора;
- четвертая проверка: по модулю и фазе входного тока ФПМ;
- пятая проверка: по модулю и фазе входного напряжения ФПМ.

В данных проверках определяются значения перечисленных величин путем их измерений и расчетным путем через найденные A -параметры эквивалентного ЧП. Расхождение рассчитанных значений с измеренными будем оценивать величиной относительной погрешности, выраженной в процентах. Измеренные значения A -параметров по аналогии с [5] можно считать приемлемыми при расчете регулировочных характеристик ТРЦ и для использования представленной методики в учебном процессе в исследованиях теоретического и экспериментального характера, если значения относительной погрешности по результатам количественных проверок не будут превышать 1 %.

При проверках по модулю используется классическая формула относительной погреш-

ности. Так, при проверке по модулю входного сопротивления трансформатора относительная погрешность вычисляется по формуле

$$\delta_{|Z|} = \frac{|Z_p| - |Z_{и}|}{|Z_{и}|} \cdot 100 \%, \quad (3)$$

где $Z_{и}$, Z_p — измеренное и расчетное значения модуля входного сопротивления.

При проверках по модулям входных токов и напряжений относительные погрешности рассчитываются аналогично.

Затруднение возникает при использовании классической формулы относительной погрешности в проверках по аргументу входного сопротивления и по фазам входных токов и напряжений. Эти величины могут принимать положительные и отрицательные значения, близкие к нулю или равные нулю, а также иметь близкие по модулю значения, но отличаться знаком. В этом случае классическая формула относительной погрешности может давать аномально большие значения погрешности или бесконечно большое значение в случае деления на ноль. Рассмотрим несколько примеров.

Пример 1. Пусть расчетное и измеренное значения фазы равны $\varphi_p = 2^\circ$ и $\varphi_{и} = -2^\circ$. Тогда в соответствии с формулами абсолютной и относительной погрешности получаем:

$$\Delta_\varphi = \varphi_p - \varphi_{и} = 2^\circ - (-2^\circ) = 4^\circ;$$

$$\delta_\varphi = \frac{\varphi_p - \varphi_{и}}{\varphi_{и}} \cdot 100 \% = \frac{2 - (-2)}{-2} \cdot 100 \% = -200 \%.$$

Пример 2. $\varphi_p = -2^\circ$ и $\varphi_{и} = 1^\circ$. Получаем:

$$\Delta_\varphi = \varphi_p - \varphi_{и} = -2^\circ - 1^\circ = -3^\circ;$$

$$\delta_\varphi = \frac{(-2) - 1}{1} \cdot 100 \% = -300 \%.$$

Пример 3. $\varphi_p = 2^\circ$ и $\varphi_{и} = 0^\circ$. Получаем:

$$\Delta_\varphi = \varphi_p - \varphi_{и} = 2^\circ - 0^\circ = 2^\circ;$$

$$\delta_\varphi = \frac{2 - 0}{0} \cdot 100 \% = \infty.$$

Пример 4. $\varphi_p = 120^\circ$ и $\varphi_{и} = -60^\circ$. Получаем:

$$\Delta_\varphi = \varphi_p - \varphi_{и} = 120^\circ - (-60^\circ) = 180^\circ;$$

$$\delta_\varphi = \frac{120 - (-60)}{-60} \cdot 100 \% = -300 \%$$

Пример 5. $\varphi_p = 90^\circ$ и $\varphi_n = -90^\circ$. Получаем:

$$\Delta_\varphi = \varphi_p - \varphi_n = 90^\circ - (-90^\circ) = 180^\circ;$$

$$\delta_\varphi = \frac{90 - (-90)}{-90} \cdot 100 \% = -200 \%$$

В данных примерах относительная погрешность измерения фазы имеет одинаково большие аномальные значения при абсолютной погрешности как в единицы, так и в сотни градусов. В то же время известно, что малое, до $\sim 10^\circ$, изменение фазы несущественно изменяет комплексную величину. Тогда как изменение на десятки градусов равносильно принципиальному изменению ее характера, вплоть до физической нереализуемости, когда речь идет о комплексном сопротивлении.

Рассмотрим еще два примера.

Пример 6. Пусть абсолютная погрешность аргумента комплексного сопротивления рав-

на 1° ($Z_n = |Z|e^{j60^\circ}$, $Z_p = |Z|e^{j61^\circ}$). Тогда относительная погрешность, согласно формуле (3), составит около 1,7%.

Пример 7. Пусть абсолютная погрешность аргумента комплексного сопротивления также равна 1° , но $Z_n = |Z|e^{j1^\circ}$, а $Z_p = |Z|e^{j2^\circ}$. В этом случае относительная погрешность аргумента составит уже 100%.

Данные примеры показывают, что при одной и той же абсолютной погрешности аргумента значения относительной погрешности могут кардинально различаться, не давая, так же как и в предыдущих примерах, адекватного представления о степени несоответствия измеренного и расчетного значений аргумента.

На рис. 3 и 4 представлены графики зависимостей $\delta_\varphi(\varphi_p)|_{\varphi_n = \text{const}}$ при фиксированных значениях φ_n , равных $-2^\circ, 1^\circ, 0^\circ, -60^\circ, 60^\circ$, построенные в области малых значений φ_p (от -10° до 10°) и в области больших значений φ_p (от -180° до 180°) соответственно. Данные зависимости рассчитаны для классической формулы относительной погрешности, то есть

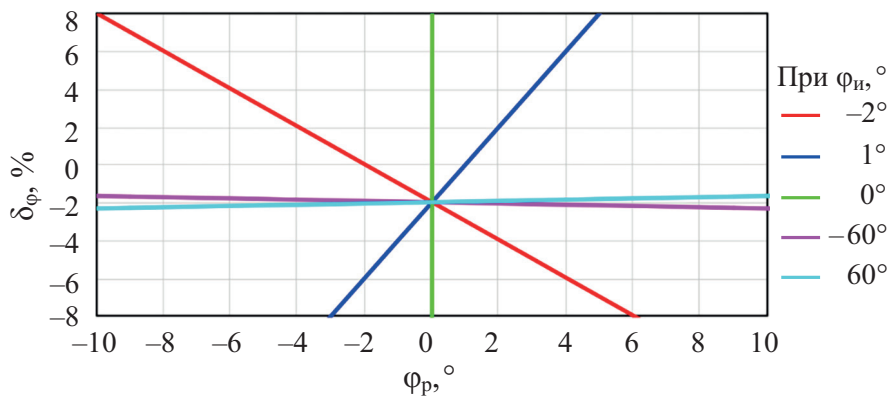


Рис. 3. Графики зависимости δ_φ от φ_p при нормировании к φ_n (в области малых φ_p)

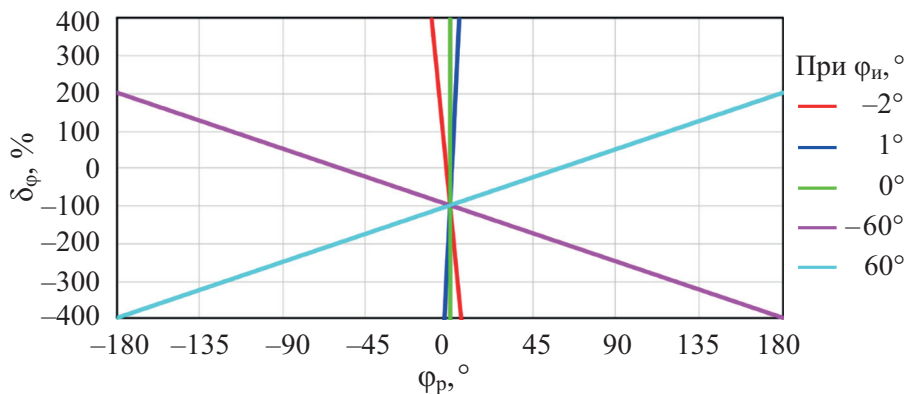


Рис. 4. Графики зависимости δ_φ от φ_p при нормировании к φ_n (в области больших φ_p)

когда абсолютная погрешность нормируется к измеренному значению фазы. Как видно из этих графиков, значение и характер изменения δ_φ (наклон графиков) существенно зависят от значения φ_n , и особенно ярко это выражено при малых значениях φ_n .

Для более адекватного отражения различия двух углов и придания смысловой нагрузки величине относительной погрешности предлагается абсолютную погрешность нормировать не к измеренному значению, а к значению 180° — максимально и минимально возможному значению разности фаз периодической функции. В этом случае восстанавливается прямая однозначная связь между величинами абсолютной и относительной погрешности и устраняется неопределенность вида «деление на ноль». Тогда формула расчета относительной погрешности по фазе/аргументу примет вид:

$$\delta_\varphi = \frac{\varphi_p - \varphi_n}{180^\circ} \cdot 100 \%. \quad (4)$$

Для рассмотренных примеров 1–7 относительная погрешность, рассчитанная по формуле (4), составит соответственно: 0,022; –0,017; 0,011; 100; 100; 0,0056; 0,0056 %. Эти значения представляются как более адекватно отражающие различия двух углов.

На рис. 5 и 6 представлены графики зависимостей $\delta_\varphi(\varphi_p)|_{\varphi_n = \text{const}}$ при тех же фиксированных значениях φ_n , построенные в области малых значений φ_p (от -10° до 10°) и в области больших значений φ_p (от -180° до 180°) соответственно. Данные зависимости рассчитаны в соответствии с формулой (4). Как видно из этих графиков, все линии имеют одинаковый наклон. Кроме того, при малых значениях φ_n линии располагаются вплотную друг к другу, чем обеспечивается малое изменение значения относительной погрешности при малом изменении значения φ_n , что логично.

С учетом изложенного в данной работе при проведении проверок будет применяться формула (4).

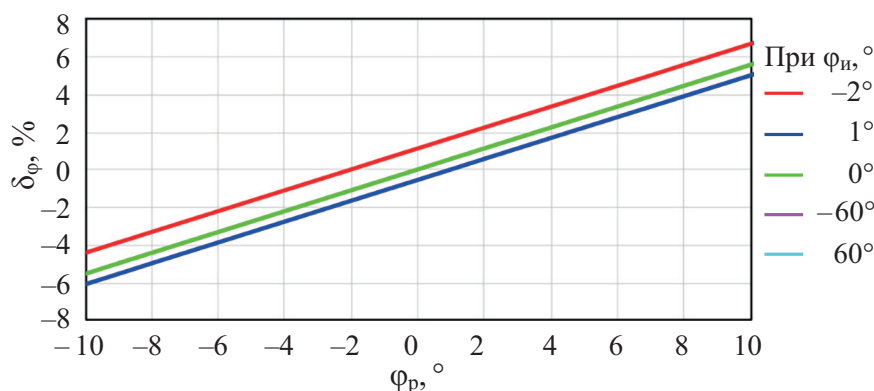


Рис. 5. Графики зависимости δ_φ от φ_p при нормировании к 180° (в области малых φ_p)

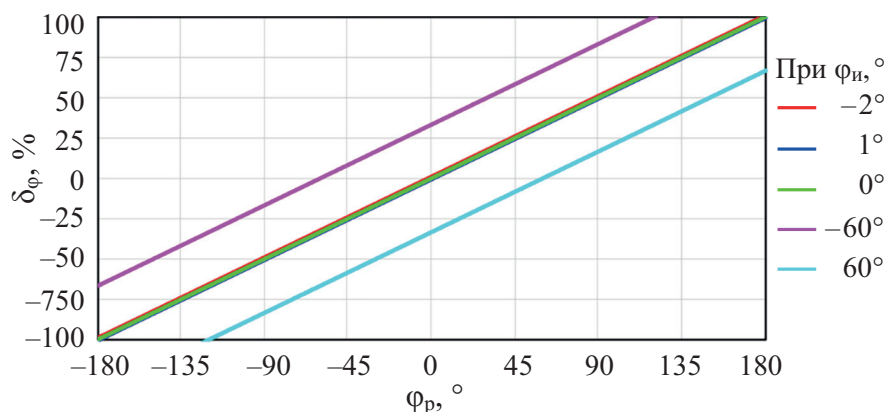


Рис. 6. Графики зависимости δ_φ от φ_p при нормировании к 180° (в области больших φ_p)

Практическая реализация методики измерения A -параметров эквивалентного четырехполюсника ФПМ

Ниже представлен пример практической реализации описанной выше методики и рассмотрены аспекты, знание и учет которых позволят избежать ошибок и получить результаты, приемлемые для использования в расчетах регулировочных характеристик тональных рельсовых цепей.

Реализация данной методики была выполнена путем измерения A -параметров ЧП ФПМ 8, 9, 11, настроенного на частоту несущей $f_n = 480$ Гц сигнала ТРЦ (вход ФПМ — контакты 11-71, выход ФПМ — контакты 12-61, установлены перемычки между контактами 42-23-22-21), и проверки адекватности полученных математических моделей трансформатора и ФПМ в целом. Рабочая точка ФПМ задавалась значением входного напряжения ФПМ (контакты 11-71), равным 3,3 В.

Для проведения измерений использовались следующие приборы и оборудование:

- программируемый лабораторный источник питания постоянного и переменного тока АК ИП-1203/3 с максимальной выходной мощностью 3000 Вт;
- измерительный комплекс, включающий многоканальный контроллер сбора данных ZETLAB ZET 038, высокочастотные высоковольтные дифференциальные пробники Testec-SI 9002, токовые пробники Tektronix TCR312A с усилителями ТСРА300;
- измеритель иммитанса E7-20;
- пять сопротивлений нагрузки ФПМ с номинальными значениями ($R_{н1} = 100$ Ом, $R_{н2} = 330$ Ом, $R_{н3} = 680$ Ом, $R_{н4} = 250$ Ом, $R_{н5} = 500$ Ом) с номинальной рассеиваемой мощностью 100 Вт. Первые три сопротивления используются при измерении A -параметров ЧП трансформатора ФПМ, последние два — при проверке правильности измерений и расчетов.

При сборке схем измерений и выполнении самих измерений следует учесть ряд важных аспектов:

1. Для уменьшения влияния переходных сопротивлений между монтажными проводами, контактами ФПМ и сопротивлениями $R_{нi}$, а также сопротивлений самих монтажных про-

водов необходимо обеспечить надежный контакт монтажных проводов (например, пайкой), а сами монтажные провода должны иметь минимальную длину и сечение не менее 1,5 мм².

2. Перед измерениями необходимо убедиться (например, с помощью осциллографа или, что лучше, анализатора спектра) в синусоидальности полезного сигнала (и напряжений, и токов) и в отсутствии сопоставимых с его уровнем помех в каждом измерительном тракте.

3. Измерительная система должна быть оттарирована для компенсации большей части систематической погрешности по каждому измерительному каналу — от входа измеряемой физической величины до выхода измеренного значения. В рассматриваемом случае тарирование выполнено с помощью прецизионного мультикалибратора FLUKE 5520A по семи измеряемым физическим величинам (два напряжения, два тока, три разности фаз). Поправка внесена в результаты измерений напряжений и токов, погрешность измерения разности фаз игнорировалась за ничтожной малостью, менее 0,3°.

4. В процессе измерений следует периодически контролировать частоту сигнала и при необходимости корректировать, не допуская отклонения более 1 Гц.

5. Все измерения выполняются в одной РТ ФПМ (и соответствующей ей РТ трансформатора ФПМ). Данное значение входного напряжения трансформатора необходимо обеспечивать неизменным, контролируя перед каждым измерением.

6. При использовании вольтметра перед измерениями необходимо проверить влияние полярности подключения измерительных выводов на его показания, измерив напряжение РТ ФПМ при прямом и при обратном подключении выводов вольтметра, чтобы убедиться в симметричности измерительного тракта.

Реализация этапа 1

1. Для определения РТ трансформатора, соответствующей заданной РТ ФПМ при нагрузке $R_{н2}$, были установлены перемычки на контактах 21-22-23-42 ФПМ, нагрузка $R_{н2}$ подключалась к выходным контактам 12-61 ФПМ. В общем же случае схема включения ФПМ (сочетание установленных перемычек для настройки в резонанс и используемых выходных

контактов) определяется его включением в схеме конкретной исследуемой ТРЦ.

2. На выходе лабораторного источника питания было задано гармоническое колебание с частотой 480 Гц.

3. В фиксированной РТ ФПМ (в рассматриваемом примере — при напряжении 3,3 В на контактах 11-71 ФПМ) была определена соответствующая ей РТ трансформатора ФПМ путем измерения напряжения $U_{РТ.тр}$ на входе трансформатора (контакты 11-42 ФПМ): $U_{РТ.тр} = 15,00$ В.

Реализация этапа 2

На данном этапе, помимо измерения $Z_{1тр.и.1}$, $Z_{1тр.и.2}$ и $Z_{1тр.и.3}$, необходимых для реализации ме-

тода трех известных нагрузок, для выполнения проверок правильности измеренных значений А-параметров ЧП трансформатора также были выполнены аналогичные измерения при подключении нагрузок $R_{и4}$, $R_{и5}$ и определены значения $Z_{1тр.и.4}$, $Z_{1тр.и.5}$.

Для проведения измерений была собрана схема, представленная на рис. 7.

К выходу трансформатора (контакты 12-61 ФПМ) поочередно подключались сопротивления $R_{и1} — R_{и5}$. При этом на входе трансформатора (контакты 11-42 ФПМ) каждый раз выставлялось напряжение $U_{РТ.тр} = 15,00$ В. При каждом подключенном сопротивлении $R_{иi}$ измерительным комплексом были измерены

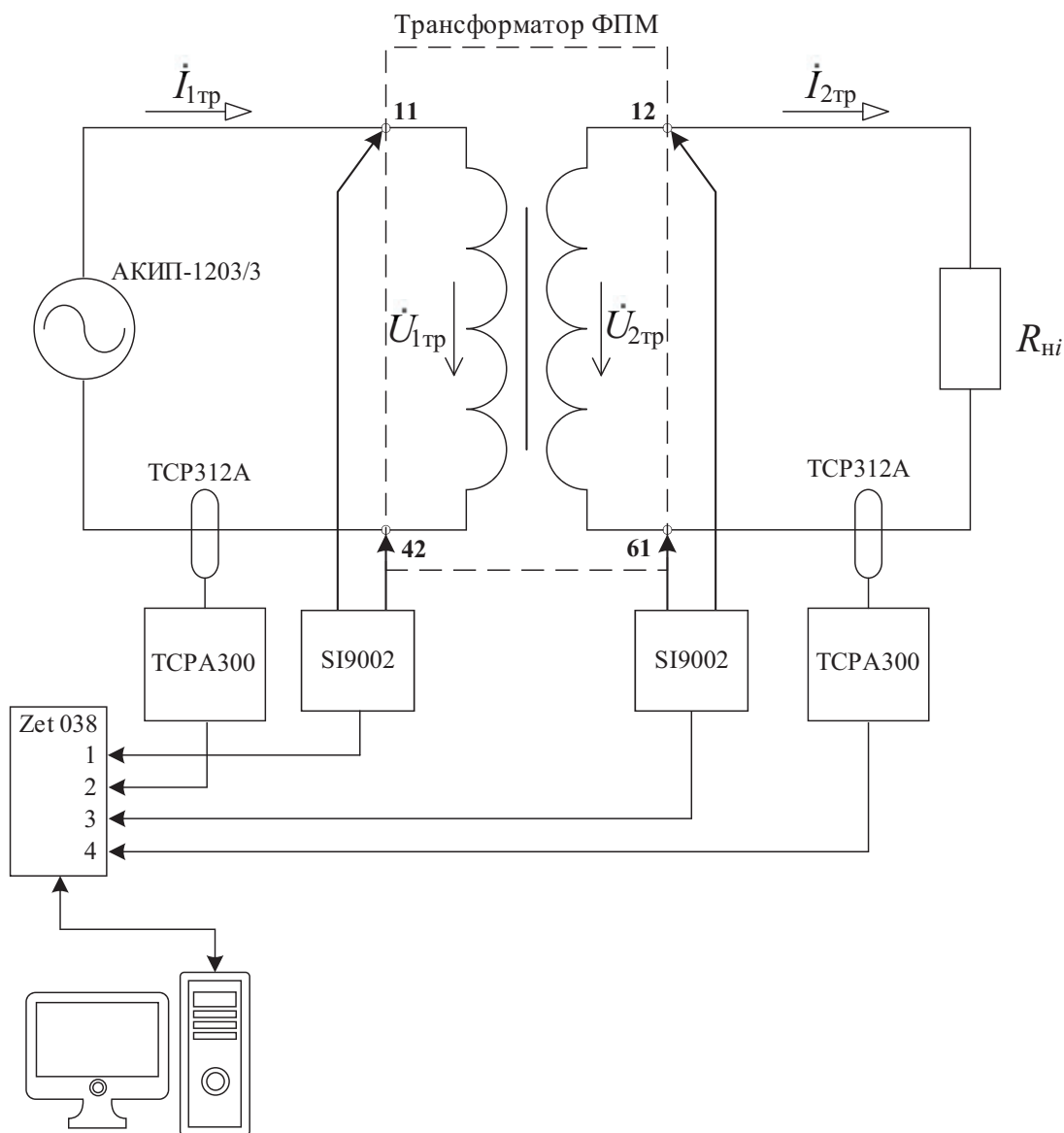


Рис. 7. Схема для измерения входного сопротивления ЧП трансформатора ФПМ (для рассматриваемого примера)

модули и фазы входного напряжения (контакты 11-42) и выходных (контакты 12-61) тока и напряжения относительно входного тока.

Далее по полученным данным измерений были рассчитаны модули $|Z_{1тр.и.і}|$ и определены аргументы $\varphi_{Z_{1тр.р.і}}$ входного сопротивления ЧП трансформатора. Результаты представлены в табл. 1. Здесь и далее приводимые результаты расчетов получены по результатам измерений, представленных с точностью до 15 значащих цифр, и округлены в таблицах до четырех значащих цифр.

ТАБЛИЦА 1. Модули и аргументы входного сопротивления трансформатора при соответствующих нагрузках

При нагрузке $R_{нi}$, Ом	$ Z_{1тр.и.і} $, Ом	$\varphi_{Z_{1тр.р.і}}$, °
$R_{н1} = 100$	63,37	59,34
$R_{н4} = 250$	71,44	74,83
$R_{н2} = 330$	72,30	77,63
$R_{н5} = 500$	73,05	80,72
$R_{н3} = 680$	73,36	82,37

Затем был выполнен расчет A -параметров ЧП трансформатора и получены следующие их значения (для рассматриваемого примера):

$$A_{тр} = 1,150 \cdot e^{-j0,44^\circ}; \quad B_{тр} = 2,649 \cdot e^{j47,68^\circ};$$

$$C_{тр} = 0,01556 \cdot e^{-j87,41^\circ}; \quad D_{тр} = 0,8976 \cdot e^{-j1,03^\circ}.$$

Реализация этапа 3

Емкость $C_{кон}$ параллельно соединенных конденсаторов $C6$, $C7$ и $C8$ (перемычки между контактами 23-22-21 ФПМ) была измерена измерителем иммитанса E7-20 и в рассматриваемом примере составила $C_{кон} = 4,472$ мкФ.

Матрица коэффициентов ЧП конденсаторов ФПМ, в соответствии с измеренным значением $C_{кон}$ и выражением (1), приняла вид

$$N_C = \begin{bmatrix} 1 & 74,14 \cdot e^{-j90^\circ} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Реализация этапа 4

По выражению (2) был выполнен расчет A -параметров ЧП ФПМ, в соответствии с которым матрица $N_{ФПМ}$ приняла вид

$$N_{ФПМ} = \begin{bmatrix} A_{ФПМ} & B_{ФПМ} \\ C_{ФПМ} & D_{ФПМ} \end{bmatrix} = N_C N_{тр} =$$

$$= \begin{bmatrix} 0,06095 \cdot e^{-j92,92^\circ} & 64,58 \cdot e^{-j89,48^\circ} \\ 0,01556 \cdot e^{-j87,41^\circ} & 0,8976 \cdot e^{-j1,03^\circ} \end{bmatrix}.$$

Важным аспектом практической реализации рассматриваемой методики является корректное выполнение качественных и количественных проверок, направленных на удостоверение правильности и точности выполненных измерений и полученных результатов.

Реализация этапа 5

На данном этапе в рамках проведения первичных качественных проверок расчетами получены следующие значения входных сопротивлений трансформатора:

$$Z_{1Хтр} = \frac{A_{тр}}{C_{тр}} = 73,87 \cdot e^{j86,98^\circ} \text{ Ом};$$

$$Z_{2Хтр} = \frac{D_{тр}}{C_{тр}} = 57,67 \cdot e^{j86,38^\circ} \text{ Ом};$$

$$Z_{1Ктр} = \frac{B_{тр}}{D_{тр}} = 2,952 \cdot e^{j48,71^\circ} \text{ Ом};$$

$$Z_{2Ктр} = \frac{B_{тр}}{A_{тр}} = 2,304 \cdot e^{j48,11^\circ} \text{ Ом}.$$

Как видно, аргументы этих сопротивлений положительны, то есть сопротивления, как и должно быть для трансформатора, имеют индуктивный характер. При холостом ходе аргументы сопротивлений близки к 90° . При переходе от режима ХХ к режиму КЗ значения модулей и аргументов входных сопротивлений уменьшаются. Такой характер значений и их изменений полностью согласуется с теорией рабочего процесса трансформатора.

Значения характеристических параметров трансформатора, рассчитанные через его измеренные A -параметры, составили:

- характеристическое сопротивление со стороны входа

$$Z_{1Стр} = \sqrt{\frac{A_{тр} B_{тр}}{C_{тр} D_{тр}}} = 14,77 \cdot e^{j67,84^\circ} \text{ Ом};$$

- характеристическое сопротивление со стороны выхода

$$Z_{2C_{\text{тр}}} = \sqrt{\frac{D_{\text{тр}} B_{\text{тр}}}{C_{\text{тр}} A_{\text{тр}}}} = 11,53 \cdot e^{j67,25^\circ} \text{ Ом};$$

- характеристическая постоянная передачи

$$g_{C_{\text{тр}}} = \ln\left(\sqrt{A_{\text{тр}} D_{\text{тр}}} + \sqrt{B_{\text{тр}} C_{\text{тр}}}\right) = 0,1903 - j0,06783;$$

- собственное затухание (ослабление)

$$a_{\text{тр}} = \text{Re}(g_{C_{\text{тр}}}) = 0,1903 \text{ Нп} \cdot 8,686 = 1,655 \text{ дБ};$$

- собственная фазовая постоянная

$$b_{\text{тр}} = \text{Im}(g_{C_{\text{тр}}}) = -0,06783 \text{ рад} = -3,886^\circ.$$

Активно-индуктивный характер полученных значений характеристических сопротивлений свойственен цепи, содержащей катушки индуктивности с потерями, и паразитная емкость (межвитковая, межобмоточная, межслойная) на рассматриваемой, относительно невысокой частоте 480 Гц еще не проявляется ввиду пренебрежимо малой величины. Положительный знак собственного затухания характерен для пассивных цепей, а величина 1–3 дБ — для цепей с небольшими потерями, используемых для передачи сигналов. Собственная же фазовая постоянная, отрицательная по значению и определяющая отставание выходного сигнала (и напряжения, и тока) от входного при согласованном включении ЧП, присуща активно-индуктивным цепям.

Проведенные качественные проверки позволяют сделать вывод об отсутствии грубых ошибок в выполненных измерениях и перейти к дальнейшим **количественным проверкам** адекватности математических моделей эквивалентных ЧП трансформатора ФПМ и ФПМ в целом.

Для **первой проверки** (по модулю и аргументу входного сопротивления трансформатора) сначала расчетным путем через измеренные значения A -параметров ЧП трансформатора были определены значения его входного сопротивления при подключенных на его выходе нагрузках $R_{н4}$ и $R_{н5}$ в соответствии с выражением

$$Z_{1\text{тр},p,i} = \frac{A_{\text{тр}} R_{нi} + B_{\text{тр}}}{C_{\text{тр}} R_{нi} + D_{\text{тр}}} \quad (i = 4, 5). \quad (5)$$

В рассматриваемом примере расчетами по выражению (5) получены следующие значения сопротивлений:

$$Z_{1\text{тр},p,4} = 71,44 \cdot e^{j74,58^\circ} \text{ Ом};$$

$$Z_{1\text{тр},p,5} = 73,09 \cdot e^{j80,65^\circ} \text{ Ом}.$$

Затем была определена относительная погрешность (в процентах) модуля и аргумента входного сопротивления трансформатора по выражениям

$$\delta_{|Z_{1\text{тр},i}|} = \frac{|Z_{1\text{тр},p,i}| - |Z_{1\text{тр},и,i}|}{|Z_{1\text{тр},и,i}|} \cdot 100 \% \quad (i = 4, 5); \quad (6)$$

$$\delta_{\varphi_{Z_{1\text{тр},i}}} = \frac{\varphi_{Z_{1\text{тр},p,i}} - \varphi_{Z_{1\text{тр},и,i}}}{180} \cdot 100 \% \quad (i = 4, 5). \quad (7)$$

При этом использованы неокругленные значения модулей и аргументов величин $Z_{1\text{тр},и,i}$, округленные значения которых представлены в табл. 1.

В рассматриваемом примере результаты расчетов по выражениям (6), (7) оказались следующими:

$$\delta_{|Z_{1\text{тр},4}|} = 0,001232 \%; \quad \delta_{\varphi_{Z_{1\text{тр},4}}} = 0,002426 \%;$$

$$\delta_{|Z_{1\text{тр},5}|} = 0,0001429 \%; \quad \delta_{\varphi_{Z_{1\text{тр},5}}} = 0,0003145 \%.$$

Как видно, относительная погрешность рассчитанных и измеренных значений модуля и аргумента входного сопротивления трансформатора не превышает по абсолютной величине 1 %.

Для **второй проверки** (по модулю и фазе входного тока трансформатора) сначала через измеренные значения коэффициентов $C_{\text{тр}}$ и $D_{\text{тр}}$ ЧП трансформатора были определены расчетные значения его входного тока при подключенных на его выходе нагрузках $R_{н4}$ и $R_{н5}$ в соответствии с выражением

$$I_{1\text{тр},p,i} = C_{\text{тр}} U_{R_{нi}} + D_{\text{тр}} I_{R_{нi}} \quad (i = 4, 5). \quad (8)$$

Далее была рассчитана относительная погрешность (в процентах) модуля и фазы входного тока трансформатора аналогично выражениям (6) и (7).

В рассматриваемом примере выполненные согласно (8) и аналогично (6) и (7) расчеты показали:

$$\delta_{|I_{1тр.4}|} = -0,2685 \% ; \quad \delta_{\varphi_{I_{1тр.4}}} = -0,0003943 \% ;$$

$$\delta_{|I_{1тр.5}|} = -0,2648 \% ; \quad \delta_{\varphi_{I_{1тр.5}}} = -0,0002885 \% .$$

Результаты второй проверки показывают, что относительная погрешность модуля и фазы входного тока трансформатора не превышает по абсолютной величине 1 %.

Для **третьей проверки** (по модулю и фазе входного напряжения трансформатора) сначала через измеренные значения коэффициентов $A_{тр}$ и $B_{тр}$ ЧП трансформатора (см. этап 2) были определены расчетные значения его входного напряжения при подключенных на его выходе нагрузках $R_{н4}$ и $R_{н5}$ в соответствии с выражением

$$U_{1тр.p.i} = A_{тр}U_{R_{ни}} + B_{тр}I_{R_{ни}} \quad (i = 4, 5), \quad (9)$$

где значения $U_{R_{ни}}$ и $I_{R_{ни}}$ были измерены на этапе 2.

Далее была рассчитана относительная погрешность (в процентах) модуля и фазы входного напряжения трансформатора аналогично выражениям (6) и (7).

В рассматриваемом примере, выполнив расчеты, получили:

$$\delta_{|U_{1тр.4}|} = -0,2710 \% ; \quad \delta_{\varphi_{U_{1тр.4}}} = -0,0003525 \% ;$$

$$\delta_{|U_{1тр.5}|} = -0,2651 \% ; \quad \delta_{\varphi_{U_{1тр.5}}} = -0,0002831 \% .$$

Результаты третьей проверки показывают, что относительная погрешность модуля и фазы входного напряжения трансформатора не превышает по абсолютной величине 1 %.

Для выполнения четвертой и пятой проверок (по модулю и фазе входного тока и по модулю и фазе входного напряжения ФПМ) была собрана схема, представленная на рис. 8. К выходу ФПМ поочередно подключались нагрузки $R_{н4}$ и $R_{н5}$, при каждой нагрузке на входе ФПМ (контакты 11-71) устанавливалось напряжение, равное заданной РТ ФПМ (в рассматриваемом примере 3,3 В) и измерялись входные и выходные токи и напряжения ФПМ: $I_{1ФПМ.и.i}$, $U_{1ФПМ.и.i}$, $I_{2ФПМ.и.i}$, $U_{2ФПМ.и.i}$ ($i = 4, 5$).

Для **четвертой проверки** (по модулю и фазе входного тока ФПМ) через измеренные значения

коэффициентов $C_{ФПМ}$ и $D_{ФПМ}$ ЧП ФПМ (см. этап 4) были найдены расчетные значения его входного тока при подключенных на его выходе нагрузках $R_{н4}$ и $R_{н5}$ в соответствии с выражением

$$I_{1ФПМ.p.i} = C_{ФПМ}U_{2ФПМ.и.i} + D_{ФПМ}I_{2ФПМ.и.i} \quad (10) \\ (i = 4, 5).$$

Далее аналогично предыдущим проверкам была рассчитана относительная погрешность (в процентах) модуля и фазы входного тока ФПМ.

В рассматриваемом примере, выполнив расчеты в соответствии с (10) и аналогично (6) и (7), получили следующие результаты:

$$\delta_{|I_{1ФПМ.4}|} = -0,2685 \% ;$$

$$\delta_{\varphi_{I_{1ФПМ.4}}} = -0,0003943 \% ;$$

$$\delta_{|I_{1ФПМ.5}|} = -0,2648 \% ;$$

$$\delta_{\varphi_{I_{1ФПМ.5}}} = -0,0002885 \% .$$

Таким образом, относительная погрешность модуля и фазы входного тока ФПМ не превышает по абсолютной величине 1 %.

Для **пятой проверки** (по модулю и фазе входного напряжения ФПМ) через измеренные значения коэффициентов $A_{ФПМ}$ и $B_{ФПМ}$ (см. этап 4) были определены расчетные значения его входного напряжения при подключенных на его выходе нагрузках $R_{н4}$ и $R_{н5}$ в соответствии с выражением

$$U_{1ФПМ.p.i} = A_{ФПМ}U_{2ФПМ.и.i} + B_{ФПМ}I_{2ФПМ.и.i} \quad (11) \\ (i = 4, 5).$$

Далее аналогично предыдущим проверкам была рассчитана относительная погрешность (в процентах) модуля и фазы входного напряжения ФПМ.

В рассматриваемом примере, выполнив расчеты в соответствии с (11) и аналогично (6) и (7), получили следующие результаты:

$$\delta_{|U_{1ФПМ.4}|} = 0,2969 \% ;$$

$$\delta_{\varphi_{U_{1ФПМ.4}}} = 0,0004458 \% ;$$

$$\delta_{|U_{1ФПМ.5}|} = 0,2715 \% ;$$

$$\delta_{\varphi_{U_{1ФПМ.5}}} = 0,0002982 \% .$$

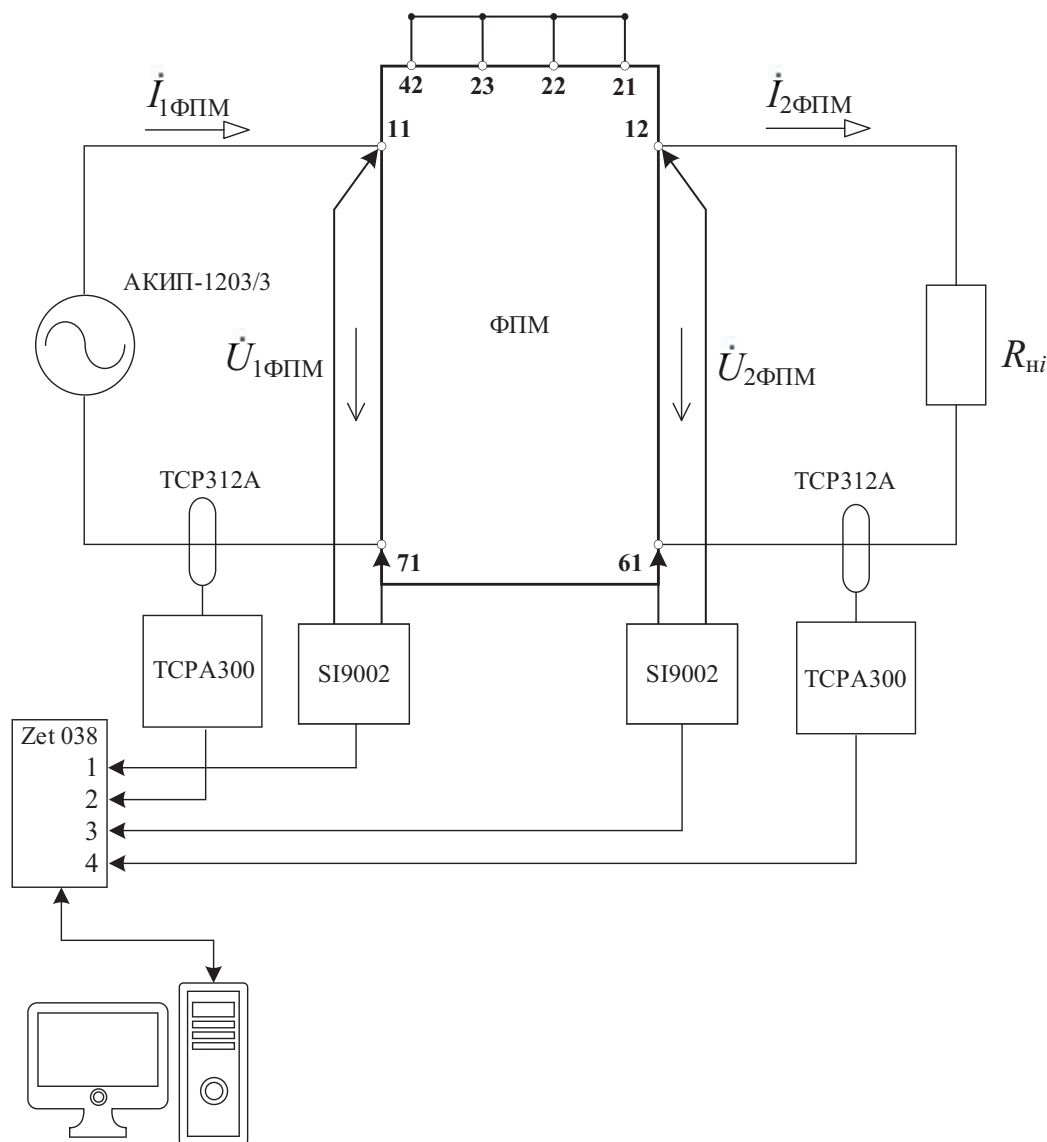


Рис. 8. Схема для измерения входного и выходного тока и напряжения ФПМ (для рассматриваемого примера)

Результаты данной проверки показывают, что относительная погрешность модуля и фазы входного напряжения ФПМ не превышает по абсолютной величине 1 %.

В итоге по результатам всех выполненных проверок относительная погрешность модуля и аргумента входного сопротивления трансформатора, входных токов и напряжений трансформатора и ФПМ не превысила 1 %, что сопоставимо со значениями погрешностей по входному току, приведенными в [5]. Это позволяет сделать вывод, что значения A -параметров эквивалентного ЧП ФПМ определены с приемлемой для использования в указанных ранее целях точностью.

На этом рассмотрение практической реализации методики измерения A -параметров эквивалентного четырехполюсника путевого фильтра тональной рельсовой цепи можно считать законченным. Заметим, что описание измерений представлено одним элементарным набором измерений — при одном (из шести необходимых) коэффициенте трансформации, на одной из девяти несущих частот и на одной из 17 (в зависимости от требуемой минимальной точности моделирования) рабочей точке входного напряжения трансформатора.

Для исследования зависимости точности моделирования трансформатора ФПМ от количества рассматриваемых рабочих точек по

напряжению ниже приводятся результаты измерений во всем диапазоне рабочих напряжений только для одного коэффициента трансформации и только на одной частоте. Результаты представлены в наборе из четырех таблиц и трех графиков. Необходимый для моделирования ФПМ полный объем данных составит $6 \times 9 = 54$ таких набора таблиц и графиков погрешности.

С применением рассмотренной методики и в соответствии со схемой измерений на рис. 3 при каждой из пяти подключаемых нагрузок $R_{нi}$ были выполнены измерения модулей и фаз входных и выходных токов и напряжений трансформатора ФПМ ($|U_{1тр}|$,

$\varphi_{U_{1тр}}$, $|I_{1тр}|$ и $\varphi_{I_{1тр}}$) на частоте 480 Гц в РТ трансформатора 1, 5, 10, 15 В и так далее, до 80 В, с шагом 5 В. Результаты измерений представлены в табл. 2. Здесь $U_{р.т.р}$ (В) в первой колонке — номинальное значение напряжения, оно идентифицирует РТ трансформатора, в которой проводились соответствующие измерения.

При измерениях фаз за нулевую фазу была принята фаза входного тока, что позволило без дополнительных вычислений определять аргумент входного сопротивления трансформатора (в этом случае он равен фазе входного напряжения $\varphi_{U_{1тр}}$).

ТАБЛИЦА 2. Результаты измерений токов и напряжений трансформатора ФПМ на частоте 480 Гц

$U_{р.т.р}$, В	$R_{нi}$, Ом	$ U_{1тр} $, В	$\varphi_{U_{1тр}}$, °	$ I_{1тр} $, А	$\varphi_{I_{1тр}}$, °	$ U_{2тр} $, В	$\varphi_{U_{2тр}}$, °	$ I_{2тр} $, А	$\varphi_{I_{2тр}}$, °
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	100	1,001	61,59	0,01679	0	0,8548	61,07	0,008398	60,73
1	250	1,001	75,94	0,01517	0	0,8629	76,00	0,003379	75,66
1	330	1,001	78,49	0,01502	0	0,8642	78,65	0,002574	78,31
1	500	1,001	81,28	0,01489	0	0,8655	81,54	0,001708	81,20
1	680	1,001	82,78	0,01484	0	0,8662	83,09	0,001254	82,75
5	100	5,006	60,14	0,07962	0	4,273	59,59	0,04192	59,23
5	250	5,005	75,25	0,07109	0	4,313	75,28	0,01687	74,93
5	330	5,005	77,96	0,07028	0	4,319	78,09	0,01287	77,74
5	500	5,005	80,95	0,06961	0	4,326	81,18	0,008561	80,83
5	680	5,005	82,54	0,06934	0	4,330	82,82	0,006288	82,47
10	100	10,01	59,63	0,1566	0	8,548	59,06	0,08388	58,70
10	250	10,01	74,98	0,1393	0	8,629	75,01	0,03375	74,65
10	330	10,01	77,75	0,1377	0	8,642	77,87	0,02572	77,52
10	500	10,01	80,81	0,1363	0	8,655	81,02	0,01709	80,67
10	680	10,01	82,43	0,1357	0	8,662	82,71	0,01256	82,36
15	100	15,01	59,34	0,2327	0	12,81	58,77	0,1257	58,40
15	250	15,01	74,83	0,2064	0	12,94	74,85	0,05055	74,49
15	330	15,01	77,63	0,2039	0	12,95	77,74	0,03856	77,39
15	500	15,01	80,72	0,2018	0	12,98	80,93	0,02562	80,58
15	680	15,01	82,37	0,2010	0	12,99	82,63	0,01881	82,28
20	100	20,01	59,15	0,3084	0	17,09	58,58	0,1677	58,22
20	250	20,01	74,75	0,2731	0	17,25	74,77	0,06738	74,41
20	330	20,01	77,57	0,2698	0	17,28	77,68	0,05141	77,32

Продолжение табл. 2

$U_{PT,TP}, B$	$R_{HI}, Ом$	$ U_{1TP} , B$	$\varphi_{U_{1TP}}, ^\circ$	$ I_{1TP} , A$	$\varphi_{I_{1TP}}, ^\circ$	$ U_{2TP} , B$	$\varphi_{U_{2TP}}, ^\circ$	$ I_{2TP} , A$	$\varphi_{I_{2TP}}, ^\circ$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
20	500	20,01	80,68	0,2670	0	17,31	80,89	0,03417	80,53
20	680	20,01	82,34	0,2658	0	17,32	82,60	0,02508	82,25
25	100	25,00	59,01	0,3835	0	21,36	58,43	0,2097	58,07
25	250	25,00	74,69	0,3392	0	21,56	74,70	0,08418	74,34
25	330	25,01	77,52	0,3350	0	21,60	77,62	0,06426	77,26
25	500	25,01	80,65	0,3315	0	21,63	80,86	0,04269	80,50
25	680	25,01	82,32	0,3301	0	21,65	82,58	0,03136	82,23
30	100	30,00	58,91	0,4584	0	25,63	58,33	0,2516	57,96
30	250	30,00	74,66	0,4050	0	25,88	74,67	0,1010	74,31
30	330	30,00	77,49	0,4001	0	25,91	77,59	0,07711	77,23
30	500	30,00	80,64	0,3959	0	25,96	80,84	0,05123	80,49
30	680	30,00	82,32	0,3942	0	25,98	82,58	0,03763	82,22
35	100	35,01	58,83	0,5333	0	29,92	58,26	0,2937	57,89
35	250	35,01	74,65	0,4709	0	30,20	74,66	0,1176	74,30
35	330	35,01	77,48	0,4651	0	30,24	77,58	0,08999	77,22
35	500	35,01	80,64	0,4601	0	30,29	80,84	0,05979	80,48
35	680	35,01	82,32	0,4582	0	30,32	82,58	0,04390	82,23
40	100	40,01	58,78	0,6080	0	34,19	58,20	0,3357	57,84
40	250	40,01	74,65	0,5366	0	34,52	74,66	0,1344	74,30
40	330	40,01	77,48	0,5300	0	34,57	77,58	0,1029	77,22
40	500	40,01	80,65	0,5243	0	34,62	80,85	0,06834	80,49
40	680	40,01	82,34	0,5221	0	34,65	82,59	0,05018	82,24
45	100	45,00	58,75	0,6827	0	38,47	58,17	0,3776	57,80
45	250	45,00	74,66	0,6021	0	38,83	74,67	0,1510	74,31
45	330	45,00	77,48	0,5948	0	38,88	77,58	0,1157	77,22
45	500	45,00	80,66	0,5884	0	38,95	80,86	0,07688	80,50
45	680	45,00	82,36	0,5859	0	38,98	82,61	0,05647	82,26
50	100	50,00	58,73	0,7575	0	42,75	58,15	0,4195	57,78
50	250	50,01	74,69	0,6679	0	43,15	74,70	0,1675	74,34
50	330	50,01	77,49	0,6597	0	43,21	77,60	0,1286	77,23
50	500	50,01	80,68	0,6527	0	43,28	80,88	0,08546	80,52
50	680	50,01	82,38	0,6499	0	43,32	82,63	0,06276	82,28
55	100	55,00	58,72	0,8322	0	47,03	58,14	0,4615	57,77
55	250	55,01	74,72	0,7336	0	47,47	74,72	0,1841	74,36
55	330	55,01	77,51	0,7247	0	47,54	77,61	0,1415	77,25
55	500	55,01	80,70	0,7170	0	47,62	80,90	0,09402	80,54

Окончание табл. 2

$U_{РТ,ТР}, В$	$R_{нп}, Ом$	$ U_{1ТР} , В$	$\varphi_{U_{1ТР}}, ^\circ$	$ I_{1ТР} , А$	$\varphi_{I_{1ТР}}, ^\circ$	$ U_{2ТР} , В$	$\varphi_{U_{2ТР}}, ^\circ$	$ I_{2ТР} , А$	$\varphi_{I_{2ТР}}, ^\circ$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
55	680	55,01	82,40	0,7139	0	47,66	82,66	0,06905	82,30
60	100	60,01	58,73	0,9069	0	51,31	58,15	0,5033	57,78
60	250	60,01	74,74	0,7994	0	51,80	74,75	0,2007	74,38
60	330	60,01	77,53	0,7897	0	51,87	77,63	0,1544	77,27
60	500	60,01	80,72	0,7814	0	51,95	80,92	0,1026	80,56
60	680	60,01	82,43	0,7780	0	52,00	82,68	0,07535	82,32
65	100	65,00	58,72	0,9819	0	55,60	58,14	0,5456	57,77
65	250	65,01	74,79	0,8653	0	56,13	74,79	0,2170	74,43
65	330	65,00	77,55	0,8550	0	56,20	77,65	0,1673	77,28
65	500	65,00	80,75	0,8459	0	56,29	80,95	0,1112	80,58
65	680	65,01	82,45	0,8422	0	56,34	82,71	0,08167	82,34
70	100	70,01	58,75	1,057	0	59,89	58,17	0,5872	57,78
70	250	70,01	74,83	0,9312	0	60,46	74,84	0,2333	74,45
70	330	70,01	77,57	0,9202	0	60,54	77,67	0,1802	77,29
70	500	70,01	80,77	0,9105	0	60,64	80,97	0,1198	80,59
70	680	70,01	82,48	0,9066	0	60,69	82,73	0,08799	82,35
75	100	75,01	58,79	1,132	0	64,19	58,21	0,6287	57,81
75	250	75,01	74,85	0,9976	0	64,79	74,86	0,2499	74,48
75	330	75,01	77,59	0,9858	0	64,88	77,69	0,1932	77,31
75	500	75,01	80,79	0,9754	0	64,99	80,99	0,1284	80,61
75	680	75,01	82,50	0,9712	0	65,04	82,76	0,09431	82,37
80	100	80,00	58,80	1,207	0	68,48	58,22	0,6708	57,83
80	250	80,00	74,90	1,064	0	69,12	74,91	0,2661	74,52
80	330	80,00	77,62	1,051	0	69,22	77,72	0,2061	77,33
80	500	80,00	80,82	1,040	0	69,33	81,02	0,1370	80,63
80	680	80,01	82,53	1,036	0	69,38	82,78	0,1007	82,40

Далее по результатам измерений были получены параметры эквивалентного ЧП трансформатора в перечисленных РТ, представленные в табл. 3–5. В таблицах приняты следующие обозначения:

- $|A|, \varphi_A, |B|, \varphi_B, |C|, \varphi_C, |D|, \varphi_D$ — модули и аргументы A -параметров трансформатора;
- $|Z_{1C}|, \varphi_{Z_{1C}}, |Z_{2C}|, \varphi_{Z_{2C}}$ — модули и аргументы соответственно входного и выходного характеристических сопротивлений трансформатора;
- a, b, n — собственное затухание (ослабление), характеристическая постоянная (коэффициент) фазы и характеристический коэффициент трансформации ($n = \sqrt{Z_{1C}/Z_{2C}}$);
- $|Z_{1X}|, \varphi_{Z_{1X}}, |Z_{1K}|, \varphi_{Z_{1K}}, |Z_{2X}|, \varphi_{Z_{2X}}, |Z_{2K}|, \varphi_{Z_{2K}}$ — модули и аргументы входных сопротивлений трансформатора со стороны входа (Z_{1X} и Z_{1K}) и со стороны выхода (Z_{2X} и Z_{2K}) в режимах ХХ и КЗ соответственно.

ТАБЛИЦА 3. А-параметры эквивалентного четырехполюсника трансформатора ФПМ на частоте 480 Гц, включенного согласно схеме на рис. 7

$U_{PT,TP}$, В	$ A $, –	φ_A , °	$ B $, Ом	φ_B , °	$ C $, См	φ_C , °	$ D $, –	φ_D , °
1	1,152	-0,54	2,707	55,40	0,01726	-87,46	0,9030	-0,83
5	1,149	-0,47	2,875	44,87	0,01610	-87,47	0,9005	-1,27
10	1,150	-0,49	2,751	50,03	0,01577	-87,47	0,8997	-0,97
15	1,150	-0,44	2,649	47,68	0,01556	-87,41	0,8976	-1,03
20	1,149	-0,48	2,791	49,93	0,01544	-87,47	0,9000	-0,97
25	1,149	-0,47	2,808	48,27	0,01533	-87,47	0,8995	-1,04
30	1,149	-0,46	2,770	47,66	0,01525	-87,48	0,8988	-1,04
35	1,150	-0,44	2,697	48,34	0,01519	-87,49	0,8979	-0,99
40	1,149	-0,47	2,753	49,61	0,01514	-87,54	0,8989	-0,96
45	1,149	-0,44	2,683	47,90	0,01510	-87,54	0,8976	-1,00
50	1,149	-0,46	2,784	49,16	0,01507	-87,60	0,8992	-0,98
55	1,149	-0,43	2,704	47,68	0,01504	-87,61	0,8977	-1,02
60	1,149	-0,46	2,785	49,10	0,01502	-87,67	0,8991	-0,98
65	1,149	-0,44	2,749	47,13	0,01500	-87,68	0,8981	-1,05
70	1,149	-0,47	2,747	49,32	0,01499	-87,73	0,8985	-0,95
75	1,149	-0,47	2,759	48,87	0,01497	-87,76	0,8985	-0,97
80	1,149	-0,43	2,673	47,19	0,01496	-87,75	0,8969	-1,01

ТАБЛИЦА 4. Характеристические параметры эквивалентного четырехполюсника трансформатора ФПМ на частоте 480 Гц, включенного согласно схеме на рис. 7

$U_{PT,TP}$, В	$ Z_{1C} $, Ом	$\varphi_{Z_{1C}}$, °	$ Z_{2C} $, Ом	$\varphi_{Z_{2C}}$, °	a , дБ	b , °	n , –
1	14,14	71,58	11,09	71,28	1,797	-3,351	1,129
5	15,09	66,57	11,83	65,77	1,736	-4,394	1,130
10	14,93	68,99	11,68	68,51	1,708	-3,76	1,131
15	14,77	67,84	11,53	67,25	1,655	-3,886	1,132
20	15,20	68,94	11,9	68,45	1,702	-3,758	1,130
25	15,30	68,15	11,97	67,59	1,693	-3,917	1,130
30	15,24	67,86	11,92	67,28	1,674	-3,940	1,131
35	15,08	68,19	11,78	67,64	1,652	-3,818	1,131
40	15,25	68,82	11,92	68,33	1,672	-3,735	1,131
45	15,08	68,01	11,78	67,44	1,641	-3,844	1,132
50	15,37	68,64	12,02	68,12	1,675	-3,795	1,130
55	15,17	67,93	11,85	67,35	1,642	-3,879	1,131
60	15,39	68,65	12,05	68,13	1,672	-3,802	1,130
65	15,31	67,71	11,97	67,10	1,650	-3,962	1,131
70	15,31	68,77	11,97	68,29	1,660	-3,759	1,131
75	15,35	68,56	12,00	68,06	1,660	-3,810	1,131
80	15,13	67,76	11,81	67,18	1,625	-3,907	1,132

ТАБЛИЦА 5. Параметры холостого хода и короткого замыкания эквивалентного четырехполюсника трансформатора ФПМ на частоте 480 Гц, включенного согласно схеме на рис. 7

$U_{рт.тр}, В$	$ Z_{1X} , Ом$	$\varphi_{Z_{1X}}, ^\circ$	$ Z_{1K} , Ом$	$\varphi_{Z_{1K}}, ^\circ$	$ Z_{2X} , Ом$	$\varphi_{Z_{2X}}, ^\circ$	$ Z_{2K} , Ом$	$\varphi_{Z_{2K}}, ^\circ$
1	66,71	86,93	2,998	56,23	52,30	86,63	2,351	55,93
5	71,36	87,00	3,192	46,14	55,93	86,20	2,502	45,34
10	72,94	86,98	3,058	51,00	57,06	86,50	2,392	50,51
15	73,87	86,98	2,952	48,71	57,67	86,38	2,304	48,11
20	74,47	86,99	3,102	50,90	58,31	86,50	2,429	50,41
25	74,97	87,00	3,122	49,30	58,68	86,44	2,443	48,74
30	75,36	87,02	3,082	48,71	58,94	86,44	2,410	48,12
35	75,67	87,04	3,004	49,34	59,11	86,49	2,346	48,79
40	75,91	87,07	3,063	50,56	59,36	86,58	2,395	50,07
45	76,11	87,11	2,989	48,90	59,45	86,54	2,335	48,34
50	76,27	87,14	3,096	50,14	59,68	86,62	2,423	49,62
55	76,41	87,17	3,012	48,69	59,69	86,59	2,353	48,11
60	76,51	87,21	3,098	50,09	59,87	86,69	2,424	49,57
65	76,61	87,24	3,061	48,18	59,89	86,63	2,393	47,57
70	76,69	87,26	3,057	50,27	59,95	86,78	2,390	49,79
75	76,74	87,29	3,071	49,84	60,00	86,79	2,401	49,33
80	76,80	87,32	2,980	48,20	59,94	86,74	2,326	47,62

С использованием полученных A -параметров (табл. 3) была выполнена проверка адекватности эквивалентного четырехполюсника трансформатору ФПМ. Для этого при пяти нагрузках рассчитаны напряжение и ток на входе трансформатора, а также его входное сопротивление через измеренные напряжение и ток нагрузки, ее сопротивление и каждую из матриц, представленных в табл. 3 наборами A -параметров. Погрешность значений входного напряжения, входного тока и входного сопротивления определена относительно соответствующих измеренных значений. Далее приведены графики зависимостей максимальных (из пяти, по числу нагрузок) значений относительной погрешности:

- по входному току трансформатора $\delta_{I_{1тр}}(U_{1тр})$ — на рис. 9;
- по входному напряжению трансформатора $\delta_{U_{1тр}}(U_{1тр})$ — на рис. 10;
- по входному сопротивлению трансформатора $\delta_{Z_{1тр}}(U_{1тр})$ — на рис. 11.

Графики данных зависимостей иллюстрируют адекватность каждой математической модели трансформатора ФПМ: чем меньше

расхождение расчетного значения тока (напряжения, сопротивления) и измеренного значения, тем точнее модель. В идеальном случае расчетные значения совпадают с измеренными. Чем больше расхождение расчетного значения и измеренного, тем грубее модель и тем большими будут относительные погрешности. Таким образом, получен 51 график — по 17 для погрешности по току, по напряжению и сопротивлению.

Графические зависимости показывают, что наиболее адекватно (с минимальной погрешностью расчетных значений относительно измеренных) работу трансформатора ФПМ описывает та математическая модель, параметры которой были измерены на том же входном напряжении.

На рис. 9–11 также показаны уровни относительной погрешности 1 и 10%. По ним можно определить интервалы входного напряжения, на которых соответствующая погрешность не превышает этих значений.

Графики на рис. 9–11 отражают нелинейность электрических параметров трансформатора ФПМ, так как ни одна из 17 матриц

A -параметров эквивалентного ЧП трансформатора не дает постоянной погрешности в диапазоне рабочих напряжений трансформатора от 5 до 80 В.

В табл. 2–4 и на рис. 9–11 представлены параметры и графики зависимостей, полученные при измерениях, выполненных в РТ трансформатора 1 В. Тем самым была симулирована ситуация, когда измерение входного сопротивления трансформатора осуществляется с помощью измерителя иммитанса, имеющего максимальное напряжение тест-сигнала 1 В. Из графиков на рис. 9 и 11 видно, что в данном случае погрешности по току и сопротивлению существенно (в разы) увеличиваются, превышая 5% во всем рабочем

диапазоне (5–80 В) входного напряжения. Графики же на рис. 10 показывают, что при использовании измерителя иммитанса (то есть при измерениях в РТ 1 В) получаемая погрешность по напряжению во всем рабочем диапазоне сопоставима с погрешностями, получаемыми при измерениях в других РТ. Таким образом, можно сделать выводы, что, во-первых, использование измерителя иммитанса для определения A -параметров трансформатора ФПМ неприемлемо, а во-вторых, проверка адекватности только по напряжению недостаточна, поскольку по напряжению погрешность может быть пренебрежимо низкой, в то время как по току и по сопротивлению — весьма существенной.

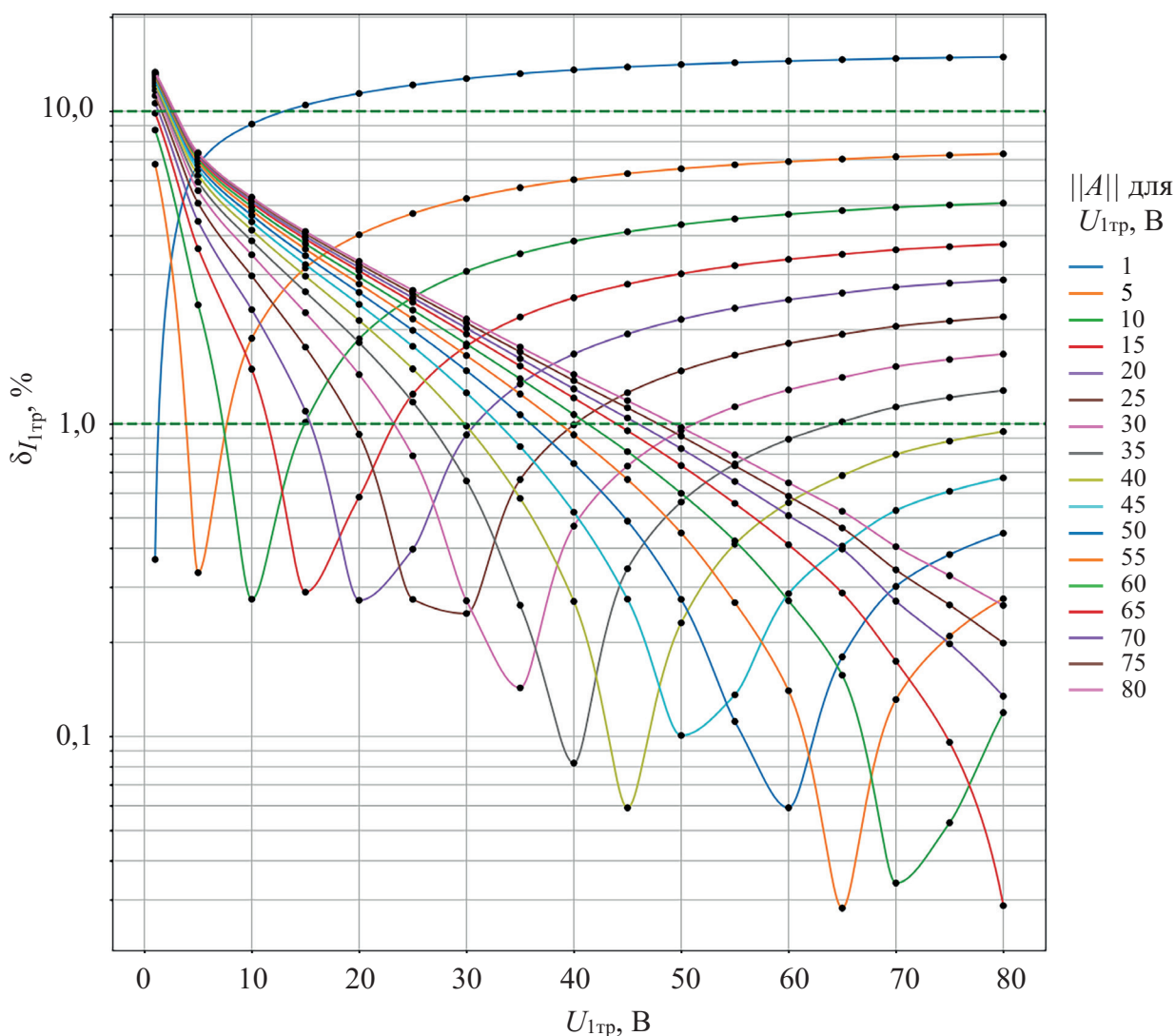


Рис. 9. Зависимости максимальной относительной погрешности по входному току трансформатора от входного напряжения для полученных матриц A -параметров трансформатора

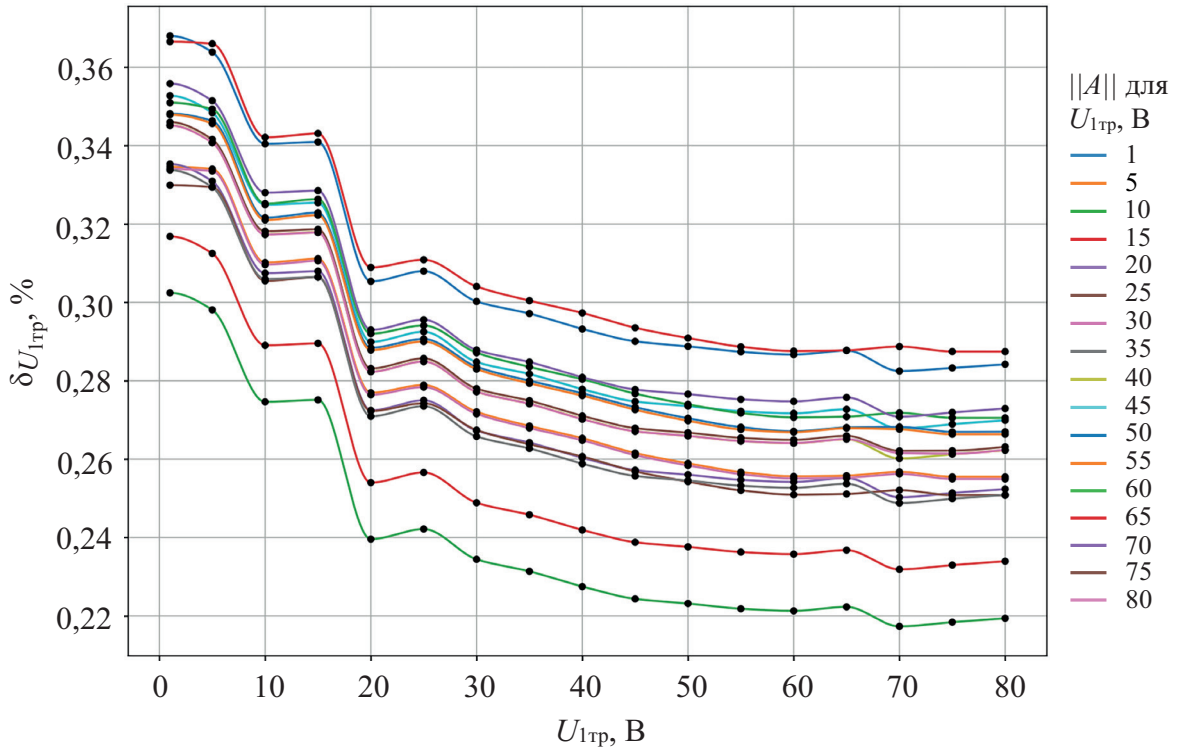


Рис. 10. Зависимости максимальной относительной погрешности по входному напряжению трансформатора от входного напряжения для полученных матриц A -параметров трансформатора

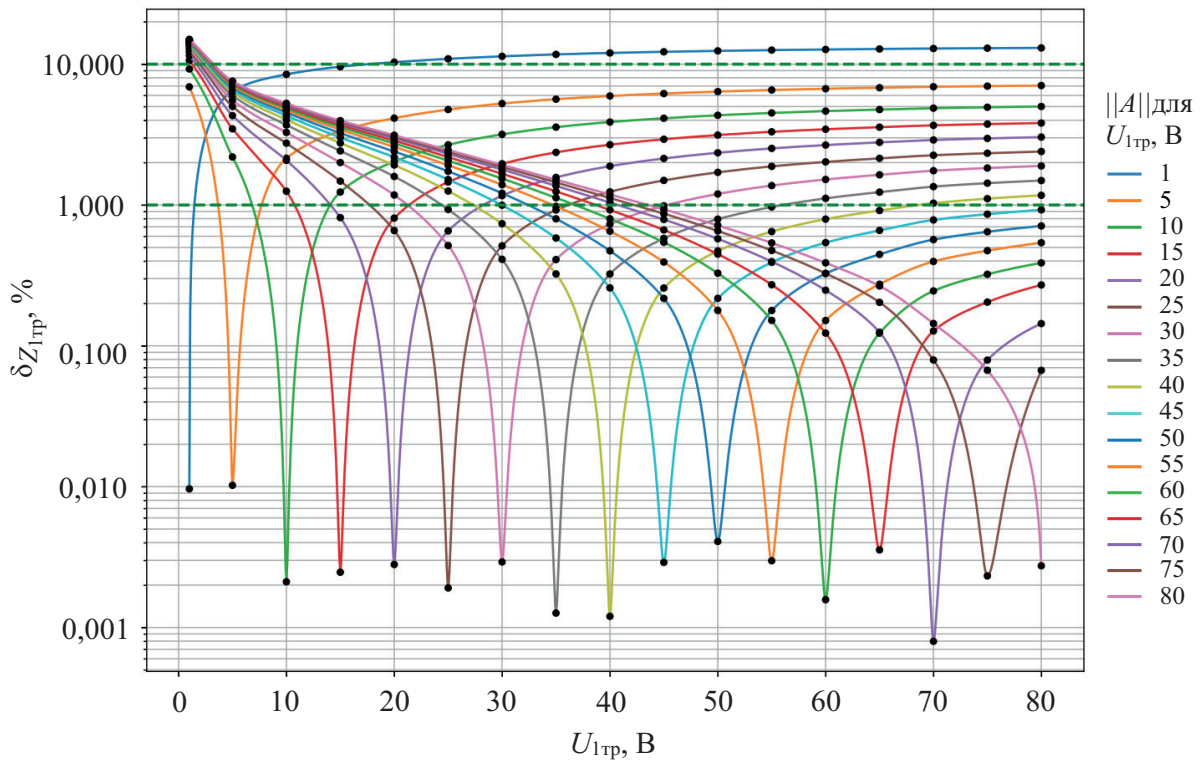


Рис. 11. Зависимости максимальной относительной погрешности по входному сопротивлению трансформатора от входного напряжения для полученных матриц A -параметров трансформатора

Характерным, к сожалению, примером ошибочного выбора измерителя иммитанса как инструмента является экспериментальное исследование входного импеданса рельсовой цепи на входе путевого трансформатора ПРТ-Г [15]. Так, при используемом коэффициенте трансформации 18 напряжение на входе будет составлять десятки вольт. В то же время тест-сигнал измерителя иммитанса использованного типа составляет 0,6 В. Таким образом, погрешность измерений, принимая во внимание существенную нелинейность ПРТ-Г вследствие отсутствия зазора в магнитопроводе, может достигать сотен процентов.

Как показывает практика, для трансформаторов погрешность входного напряжения, рассчитанного через A -параметры, невелика (в районе нескольких процентов), в то время как погрешность входного тока, рассчитанного через A -параметры, вне рабочей точки может достигать десятков и сотен процентов. Так, из результатов исследования дроссель-трансформаторов видно, что если погрешность входного напряжения (графики на рис. 2 и 4 [7]) укладывается в 4,1 и 1,4 % во всем диапазоне напряжений, то погрешность входного тока при этом составляет соответственно до 35 и 25 % (графики на рис. 1 и 3 [7]). Графики на рис. 9 и 10 также показывают, что погрешность по модулю входного тока может превышать погрешность по модулю входного напряжения в несколько раз. Таким образом, необходим комплекс проверок как трансформатора, так и ФПМ в целом, включающий проверки как по напряжению, так и по току, а также по входному сопротивлению и характеристическим параметрам трансформатора.

Представленные графики зависимости относительной погрешности по току и напряжению дают ответ на вопрос о причине расхождения расчетных и измеренных значений в реальной рельсовой цепи да и в ее лабораторном макете. Близкое совпадение измеренных и рассчитанных напряжений и существенное, достигающее до 100 % несовпадение токов авторам доводилось наблюдать при проведении экспериментов на макетах рельсовой цепи и в условиях эксплуатации при измерениях в действующих РЦ, когда в качестве параметров математической модели использовались

A -параметры эквивалентных ЧП трансформаторов, представленные в [3, 4, 16] как универсальные, не зависящие от напряжения на входных/выходных зажимах. Графики, полученные в данной работе, как и в других упомянутых трудах, иллюстрируют причину расхождения рассчитанных и измеренных значений тока как следствие несоответствия математической модели устройства моделируемому устройству. Несложно спрогнозировать, какими будут результаты измерения параметров нелинейного трансформатора с помощью автоматизированных аппаратно-программных комплексов, не учитывающих описанные особенности.

Заключение

Использование предельных режимов холостого хода и короткого замыкания вследствие нелинейности трансформатора ФПМ на практике не позволяет получить значения A -параметров эквивалентного четырехполюсника ФПМ, корректные во всем диапазоне возможных значений входного напряжения ФПМ.

Переход к измерению A -параметров в заданной РТ ФПМ (учитывающей реальные условия его эксплуатации) с применением метода трех известных нагрузок позволяет получить набор значений параметров, справедливый в этой РТ ФПМ и ее окрестностях. Такой подход делает возможным использование линейной модели трансформатора ФПМ в виде набора A -параметров эквивалентного четырехполюсника, справедливого в определенном интервале значений входного напряжения в зависимости от уровня допустимой погрешности.

Рассмотренная методика измерения A -параметров эквивалентного четырехполюсника ФПМ, включающая в себя ряд количественных и качественных проверок результатов измерений, может быть применена к ФПМ всех типов, на всех используемых в ТРЦ частотах, во всем диапазоне значений входного напряжения ФПМ. Кроме того, она может быть применена и в рамках подхода, когда периодический сигнал ТРЦ в виде модулированного несущего колебания, имеющий сложный спектр, представляется в виде разложения в ряд Фурье. В этом случае A -параметры ФПМ, измеренные на

одной заданной частоте, следует применять не ко всему сигналу, а только к соответствующей по частоте гармонике спектра сигнала. Тогда в каждой РТ эквивалентный ЧП ФПМ будет характеризоваться не одним набором, а совокупностью наборов A -параметров — по одному набору для каждой присутствующей в спектре сигнала гармоники.

Практическое применение данной методики измерения A -параметров эквивалентного ЧП ФПМ в организациях и на предприятиях, осуществляющих разработку и (или) актуализацию цифровых двойников ТРЦ, с учетом рассмотренных в настоящей статье аспектов позволит повысить адекватность входящих в состав этих двойников математических моделей ФПМ за счет учета нелинейности трансформатора ФПМ. Методика также вполне реализуема в учебном процессе, поскольку не предъявляет особых требований к используемым приборам и оборудованию. В частности, при применении метода трех вольтметров отпадает необходимость в наличии дорогостоящего измерительного комплекса из четырехканального цифрового осциллографа, дифференциального преусилителя и токовых датчиков (пример такого комплекса был приведен выше). Наличие таких приборов и оборудования также не предусмотрено и упомянутым выше Регламентом технической и технологической оснащённости дистанций сигнализации, централизации и блокировки — структурных подразделений Центральной дирекции инфраструктуры.

Рассмотренная методика может быть использована и при разработке и конструировании автоматизированных измерителей A -параметров эквивалентных четырехполюсников трансформаторов, применяемых в рельсовых цепях. ▲

Список источников

1. Поменков Д. М. Цифровая трансформация хозяйства автоматики и телемеханики // Автоматика, связь, информатика. 2019. № 4. С. 12–14. EDN ZCKVMD
2. Shubinsky I. B., Rozenberg E. N., Baranov L. A. Safety-critical railway systems // Editor(s): Mangey Ram, Liudong Xing, In *Advances in Reliability Science, Reliability Modeling in Industry 4.0*, Elsevier, 2023, pp. 83–122. DOI: 10.1016/B978-0-323-99204-6.00006-6
3. Аркатов В. С., Кравцов Ю. А., Степенский Б. М. Рельсовые цепи. Анализ работы и техническое обслуживание. М.: Транспорт, 1990. 295 с.
4. Рельсовые цепи магистральных железных дорог / В. С. Аркатов [и др.], 3-е изд., перераб. и доп. М.: Миссия-М, 2006. 496 с.
5. Щербина Е. Г., Щербина А. Е. Определение параметров математической модели дроссель-трансформатора // Автоматика, связь, информатика. 2023. № 5. С. 17–23. DOI: 10.34649/AT.2023.5.5.003. EDN RCPQAN
6. Дмитренко И. Е., Устинский А. А., Цыганков В. И. Измерения в устройствах автоматики, телемеханики и связи на железнодорожном транспорте. М.: Транспорт, 1982. 312 с.
7. Щербина, Е. Г., Щербина А. Е., Гоман Е. А. Параметры эквивалентного четырехполюсника дроссель-трансформаторов ДТЕ-0,2/0,4-1500М // Автоматика, связь, информатика. 2023. № 10. С. 15–22. EDN OVJIND
8. Медведев Д. Д. Определение первичных параметров путевых фильтров // Сборник студенческих научных работ. Гомель: Белорусский государственный университет транспорта, 2022. Вып. 27, ч. II. С. 67–70.
9. Хоменко С. И., Медведев Д. Д., Залесовский В. А. Микропроцессорный измеритель параметров четырехполюсников // Проблемы безопасности на транспорте: материалы X Международной научно-практической конференции (Гомель, 26–27 ноября 2020 года). Гомель: Белорусский государственный университет транспорта, 2020. Ч. 1. С. 48–50.
10. Неклюдов Ю. Н. Выбор методики измерения A -параметров четырехполюсника замещения трансформатора // Инновации. Наука. Образование. 2021. № 39. С. 193–208. EDN GNVJLM
11. Медведев Д. Д., Хоменко С. И., Жигалин И. О. Особенности измерения первичных параметров путевых фильтров // Проблемы безопасности на транспорте: материалы XII Международной научно-практической конференции (Гомель, 24–25 ноября 2022 года). Гомель: Белорусский государственный университет транспорта, 2022. Ч. 1. С. 223–225.
12. Медведев Д. Д., Хоменко С. И., Жигалин И. О. Определение первичных параметров элементов ЖАТС с ферромагнитными компонентами // Вестник Белорусского государственного университета транспорта: наука и транспорт. 2023. № 2 (47). С. 11–13.
13. Методика измерения A -параметров эквивалентного четырехполюсника путевого фильтра ФПМ / Р. Р. Юсупов [и др.] // Автоматика, связь, информатика. 2026. № 4. С. 12–15. DOI: 10.62994/AT.2026.4.4.003. EDN WLXWJV

14. Расчет А-параметров четырехполюсника фильтра путевого ФПМ: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022619457 Российская Федерация. № 2022618492 / Р.Р. Юсупов, А.С. Хохрин, В.Б. Леушин; заявл. 10.05.2022; опубл. 23.05.2022; заявитель Самарский государственный университет путей сообщения. EDN PRAZGZ
15. Ходкевич А.Г., Соколов М.М., Рыбина Л.А. Определение зависимости импеданса рельсовой линии от положения шунта // Автоматика, связь, информатика. 2026. № 2. С. 17–19. DOI: 10.62994/AT.2026.2.2.004. EDN RTCQAI
16. Сороко В.И., Фотькина Ж.В. Аппаратура железнодорожной автоматики и телемеханики: справочник: в 5 кн. Кн. 1. 5-е изд. М.: НПФ «Планета», 2020. 968 с.

TRANSPORT AUTOMATION RESEARCH. 2026. Vol. 12, no. 2, pp. 89–113
DOI: 10.20295/2412-9186-2026-12-02-89-113

Theoretical And Practical Aspects of Measuring the A-Parameters of the Equivalent Two-Port Network of the Track Filter

Information about authors

Iusupov R. R.¹, PhD in Engineering, Associate Professor, Associate Professor of Department "Automation, Remote Control and Communications in Railway Transport"; e-mail: r.iusupov@samgups.ru

Khokhrin A. S.¹, PhD in Engineering, Associate Professor of Department "Automation, Remote Control and Communications in Railway Transport"; e-mail: a.hokhrin@samgups.ru

Shcherbina E. G.², PhD in Engineering, Associate Professor, Technical Director; e-mail: evgeny.shcherbina@1520signal.ru

Shcherbina A. E.², PhD in Engineering, Head of the Track Circuits Department; e-mail: alexey.shcherbina@1520signal.ru

Pavlov E. V.³, PhD in Engineering, First Deputy General Director; e-mail: ev.pavlov@elteza.ru

¹ Volga State Transport University (VSTU), Samara

² 1520 Signal Ltd., Moscow

³ Electrical Engineering Plants Incorporated Joint Stock Company (ELTEZA JSC), Moscow

Abstract: when developing and subsequently updating digital twins of audio-frequency track circuits, a need arises to measure the *A* parameters (coefficients *A*, *B*, *C*, *D*) of equivalent two port networks of the equipment being part of a specific track circuit. Measuring the *A* parameters of the two port network of the track filter TF used in audio-frequency track circuits is complicated by the nonlinearity of the transformer included in the TF, which makes these parameters dependent on the voltage at the TF input. Currently applied methods for measuring the *A* parameters of linear two port networks are reviewed. Aspects of the practical implementation of the methodology earlier proposed by the authors for measuring the *A* parameters of the TF two port network are presented. The methodology takes into account the nonlinearity of the TF transformer by performing measurements at a specific operating point of the TF, understood as a given voltage value at its input. The methodology was implemented for a TF 8,9,11 filter tuned to a carrier frequency of 480 Hz with a TF input voltage of 3.3 V. The coefficient matrix of the TF two port network was calculated. Measurement verification was carried out. The relative error of the magnitude and argument of the transformer input impedance, of the magnitudes and phases of the transformer input current and voltage, and of the magnitudes and phases of the TF input current and voltage did not exceed 1% in absolute value. The use of methods for measuring the *A* parameters of linear two port networks under open circuit and short circuit conditions, due to the nonlinearity of the TF transformer, may lead to incorrect values of the parameters of the TF two port network. The methodology for measuring the *A* parameters of the TF two port network, considered

in the paper through a specific practical example, makes it possible to determine the values of the parameters of the TF two port network with an accuracy acceptable for use in calculations of adjustment characteristics of track circuits.

Keywords: digital twin, audio-frequency track circuit, track filter, three-known-loads method, methodology for measuring, operating point

References

- Pomenkov D. M. Tsifrovaya transformatsiya khozyajstva avtomatiki i teleme-khaniki [Digital Transformation of Automation and Telemechanics Systems], *Avtomatika, svyaz', informatika [Automation, Communications, Informatics]*, 2019, no. 4, pp. 12–14. EDN ZCKVMD (In Russian)
- Shubinsky I. B., Rozenberg E. N., Baranov L. A. Safety-Critical Railway Systems, ed. By M. Ram, L. Xing, In *Advances in Reliability Science, Reliability Modeling in Industry 4.0*, Elsevier, 2023, pp. 83–122. URL: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99204-6.00006-6>
- Arkatov V. S., Kravtsov Yu. A., Stepensky B. M. Rel'sovye tsepi. Analiz raboty i tekhnicheskoe obsluzhivanie [Rail Circuits. Analysis of Operation and Maintenance], Moscow, Transport, 1990, 295 p. (In Russian)
- Arkatov V. S., et al. Rel'sovye tsepi magistral'nykh zheleznikh dorog [Rail Circuits of Mainline Railways: A Reference Book], 3rd ed., revised and enlarged. Moscow, Missiya-M, 2006, 496 p. (In Russian)
- Shcherbina E. G., Shcherbina A. E. Opredelenie parametrov matematicheskoy modeli drossel'-transformatora [Determination of Parameters of the Mathematical Model of an Impedance Bond], *Avtomatika, svyaz', informatika [Automation, Communications, Informatics]*, 2023, no. 5, pp. 17–23. DOI: 10.34649/AT.2023.5.5.003. EDN RCPQAH (In Russian)
- Dmitrenko I. E., Ustinsky A. A., Tsygankov V. I. Izmereniya v ustrojstvakh avtomatiki, telemekhaniki i svyazi na zheleznodorozhnom transporte [Measurements in Railway Automation, Telemechanics and Communication Devices], Moscow, Transport, 1982, 312 p. (In Russian)
- Shcherbina E. G., Shcherbina A. E., Goman E. A. Parametry ekvivalentnogo chetyrekhpol'yusnika drossel'-transformatorov DTE-0,2/0,4-1500M [Parameters of the Equivalent Two-Port Network of Impedance Bonds DTE-0.2/0.4-1500M], *Avtomatika, svyaz', informatika [Automation, Communications, Informatics]*, 2023, no. 10, pp. 15–22. EDN OVJIHD (In Russian)
- Medvedev D. D. Opredelenie pervichnykh parametrov putevykh fil'trov, sbornik studencheskikh nauchnykh rabot [Determination of Primary Parameters of Track Filters, collection of Student Scientific Papers], Gomel: Belarusian State University of Transport, 2022, iss. 27, part II, pp. 67–70. (In Russian)
- Khomenko S. I., Medvedev D. D., Zalesovsky V. A. Mikroprotsessornyy izmeritel' parametrov chetyrekhpol'yusnikov. Problemy bezopasnosti na transporte: materialy X Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. [Microprocessor-Based Meter for Two-Port Network Parameters. Transport Safety Problems: Proceedings of the X International Scientific-Practical Conf.], Gomel, November 26–27, 2020). Gomel, Belarusian State University of Transport, 2020, part I, pp. 48–50. (In Russian)
- Neklyudov Yu. N. Vybór metodiki izmereniya A-parametrov chetyrekhpol'yusnika zameshcheniya transformatora [Choice of Methodology for Measuring

- A-Parameters of the Equivalent Two-Port Network of a Transformer], *Innovatsii. Nauka. Obrazovanie [Innovation. Science. Education]*, 2021, no. 39, pp. 193–208, EDN GNVJLM (In Russian)
11. Medvedev D. D., Khomenko S. I., Zhigalin I. O. Osobennosti izmereniya pervichnykh parametrov putevykh fil'trov. Problemy bezopasnosti na transporte: materialy XII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. [Features of Measuring Primary Parameters of Track Filters. Transport Safety Problems: Proceedings of the XII International Scientific-Practical Conf.], Gomel, November 24–25, 2022, Gomel, Belarusian State University of Transport, 2022, part I, pp. 223–225. (In Russian)
 12. Medvedev D. D., Khomenko S. I., Zhigalin I. O. Opredelenie pervichnykh parametrov elementov ZhATS s ferromagnitnymi komponentami [Determination of Primary Parameters of Railway Automation and Telemechanics Elements with Ferromagnetic Components], *Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta transporta: nauka i transport [Bulletin of the Belarusian State University of Transport: Science and Transport]*, 2023, no. 2 (47), pp. 11–13. (In Russian)
 13. Yusupov R. R., et al. Metodika izmereniya A-parametrov ekvivalentnogo chetyrekhpol'yusnika putevogo fil'tra FPM / R [Methodology for Measuring A-Parameters of an Equivalent Four-Port Network of the Track Filter], *Avtomatika, svyaz', informatika [Automation, Communications, Informatics]*, 2026, no. 4, pp. 12–15. DOI: 10.62994/AT.2026.4.4.003. EDN WLXWJV (In Russian)
 14. Yusupov R. R., Khokhrin A. S., Leushin V. B. Svidetelstvo o gosudarstvennoj registratsii programmy dlya EVM № 2022619457 Rossijskaya Federatsiya. Raschet A-parametrov chetyrekhpol'yusnika filra putevogo FPM [Certificate of State Registration of Computer Program No. 2022619457, Russian Federation. Calculation of A-Parameters of the Four-Pole Network of the Fpm Track Filter], no. 2022618492, filed May 10, 2022, published May 23, 2022, applicant Samara State Transport University. EDN PRAZGZ (In Russian)
 15. Khodkevich A. G., Sokolov M. M., Rybina L. A. Opredelenie zavisimosti impedansa rel'sovoj linii ot polozheniya shunta [Determination of the Dependence of the Impedance of the Rail Line on the Position of the Shunt], *Avtomatika, svyaz', informatika [Automation, Communications, Informatics]*, 2026, no. 2, pp. 17–19. DOI: 10.62994/AT.2026.2.2.004. EDN RTCQAI (In Russian)
 16. Soroko V. I., Fot'kina Zh. V. Apparatura zheleznodorozhnoj avtomatiki i telemekhaniki: spravochnik [Railway Automation and Telemechanics Equipment: A Handbook], in 5 vols, vol. 1, 5th ed., Moscow, NPF "Planeta", 2020, 968 p. (In Russian)