

## Исследование частотных характеристик индуктивных датчиков в схемах измерения частичных разрядов

ЖУЙКОВ А.В., КОЛПАКОВА П.А., МАТВЕЕВ Д.А., ФРОЛОВ М.В., ХРЕНОВ С.И.

НИИ «МЭИ», Москва, Россия

*Анализ результатов измерений характеристик частичных разрядов в изоляции электрооборудования электрическим методом необходимо выполнять с учетом частотных характеристик как оборудования испытательной установки, так и элементов измерительной цепи, в особенности датчиков, в которых формируется отклик на сигналы частичных разрядов. В статье сформулированы методические основы подхода к определению этих частотных характеристик, минимизирующего погрешности измерения. Приведены и проанализированы частотные характеристики для индуктивных датчиков двух видов: на принципе трансформатора напряжения и трансформатора тока. Это позволяет проектировать датчики под решение конкретных задач измерения. Для датчиков на принципе трансформатора тока показано, что падающий характер фазочастотной характеристики ограничивает их рабочий частотный диапазон. Для датчиков на принципе трансформатора напряжения проанализировано влияние на частотные характеристики типа ферритового сердечника и входного сопротивления измерительного прибора. Показано, что путем выбора материала сердечника можно регулировать длительность отклика и обеспечить раздельную регистрацию часто повторяющихся разрядов. Определено условие обеспечения колебательного характера отклика от индуктивного датчика, подключенного к низкоомному входу измерительного прибора. Приведены рекомендации по конструктивному исполнению датчиков для снижения искажения и ослабления сигналов.*

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** частичные разряды, индуктивные датчики, высоковольтные испытания, частотные характеристики, электрический метод измерения

Измерение характеристик частичных разрядов (ЧР) – важнейшая задача при контроле состояния изоляции электрооборудования как на его производстве, так и в эксплуатации [1–3]. Различным аспектам этой задачи посвящено множество работ, систематическое обобщение которых периодически освещается в технических брошюрах СИГРЭ [4–6] и находит свое отражение в новых редакциях стандарта МЭК [7] и отечественного стандарта [8]. Несмотря на простоту схем замещения установок для измерения сигналов ЧР интерпретация результатов этих измерений часто затруднена из-за частотной зависимости параметров как измерительной цепи, так и основного оборудования испытательной установки. Поэтому анализ этих частотных зависимостей и выявление основных закономерностей в них – методически значимая задача. Помимо этого, частотные характеристики (ЧХ) нужны как инструмент при проектировании датчиков и схем измерений под конкретные условия испытаний, в частности при известной частоте помехи. Учет частотной зависимости параметров датчиков ЧР и испытательного оборудования необходим и в численном моделировании.

В схемах измерения кажущегося заряда ЧР в условиях заводских испытаний и эксплуатации применя-

ются датчики индуктивного типа, которые могут быть выполнены на принципе трансформатора напряжения или трансформатора тока. Частотным характеристикам датчиков последнего типа посвящен ряд работ [9–15]. Настоящая статья посвящена исследованиям частотных характеристик преимущественно датчиков ЧР на принципе трансформатора напряжения.

Измерение частотных характеристик датчиков ЧР даже при наличии специализированного оборудования может сопровождаться ошибками. Поэтому перед тем как приступить к анализу ЧХ, изложим наш подход к их измерению и сформулируем основные методические положения для проведения этих измерений.

**Измерение частотных характеристик датчиков ЧР и оборудования испытательной установки.** Измерение ЧХ датчиков и оборудования схемы измерений ЧР электрическим методом проводилось векторным анализатором цепей (*Vector Network Analyzer – VNA*) Keysight 5061B совместно с широкополосным токовым датчиком Pearson Current Monitor 2100 и пробниками напряжения. На рис. 1 показана упрощенная схема VNA с функцией амплитудно-фазовых измерений (*Gain-Phase*).

Встроенный источник синусоидального напряжения варьированной частоты (выход *LF Out*) имеет вну-

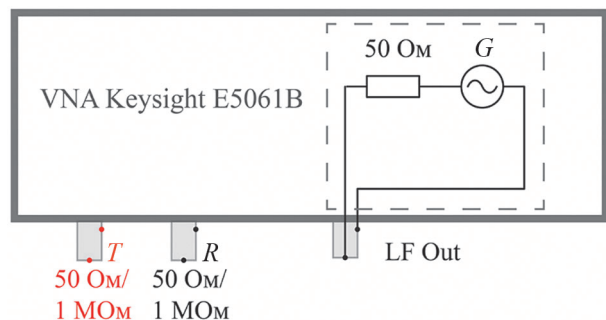


Рис. 1. Упрощенная схема векторного анализатора цепей (VNA)

Fig. 1. Simplified scheme of a vector network analyzer (VNA)

трение сопротивление 50 Ом. Измерительные входы  $T$  и  $R$  имеют переключаемое внутреннее сопротивление, которое может принимать значения 50 Ом и 1 МОм. Результатом измерений является комплексное отношение сигналов измерительных входов  $T$  и  $R$  как функция частоты. Приводятся результаты измерений ЧХ трех величин.

### 1. Входная проводимость датчика ЧР

$$Y_{\text{вх}} = \frac{I_1}{U_1}, \quad (1)$$

где  $I_1$ ,  $U_1$  – ток и напряжение первичной обмотки датчика.

Входная проводимость датчиков ЧР измерялась в трех режимах: холостого хода (ХХ), короткого замыкания (КЗ) и нагрузки на активное сопротивление 50 Ом. Схема измерения ЧХ входной проводимости датчика ЧР показана на рис. 2,а.

2. Частотная характеристика отношения напряжения вторичной обмотки датчика к напряжению первичной обмотки датчика ЧР, называемая далее передаточной функцией:

$$H = \frac{U_2}{U_1}, \quad (2)$$

где  $U_2$  – напряжение вторичной обмотки датчика ЧР.

Передаточная функция измерялась при подключении вторичной обмотки датчика ЧР к входу VNA сопротивлением 1 МОм и 50 Ом. Схема измерения передаточной функции датчика показана на рис. 2,б.

### 3. Передаточное сопротивление датчика ЧР

$$Z_{\text{т}} = \frac{U_2}{I_1}. \quad (3)$$

Передаточное сопротивление измерялось при подключении вторичной обмотки датчика ЧР к входу VNA сопротивлением 1 МОм и 50 Ом. Схема измерения ЧХ передаточного сопротивления датчика ЧР показана на рис. 2,в.

Кроме ЧХ датчиков ЧР приводятся результаты измерений ЧХ оборудования схемы измерений ЧР элек-

трическим методом: соединительного конденсатора, защитного резистора и объекта испытаний. В большинстве случаев это двухполюсники, а схема измерений ЧХ входной проводимости аналогична показанной на рис. 2,а.

Для обеспечения корректности результатов измерений ЧХ и их последующей интерпретации необходимо нивелировать два основных источника ошибок, имеющих место при таких измерениях.

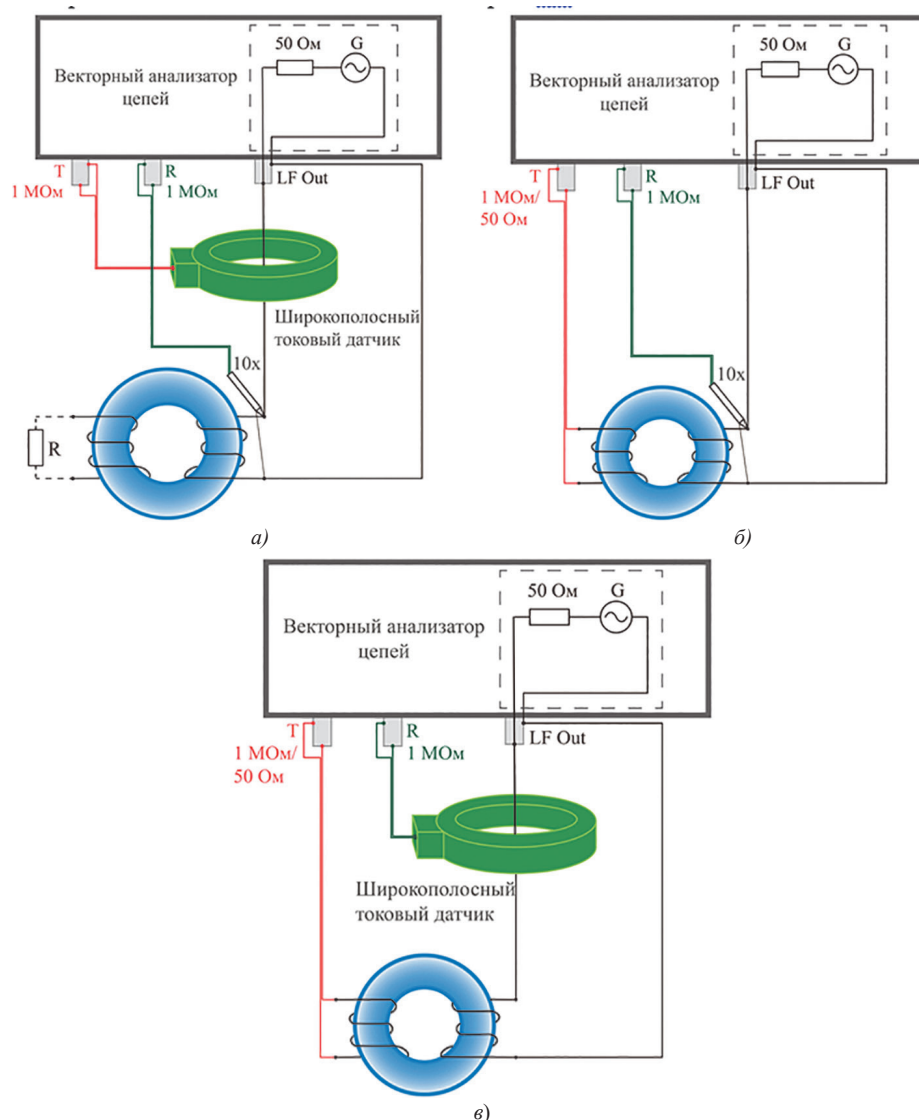
1. Паразитные емкости, индуктивности и активные сопротивления схемы: емкости пробника, измерительных входов VNA, индуктивности и емкости соединительных проводов, в качестве которых могут использоваться многожильные провода и коаксиальные кабели, контактные сопротивления. Ошибки, связанные с перечисленными факторами, особенно проявляются в области частот выше нескольких сотен кГц. Минимизация влияния емкости измерительных входов VNA и пробника достигается использованием последнего в режиме десятикратного ослабления сигнала ( $10^x$ ) (рис. 2,а и б). Емкость пробника в таком режиме практически на порядок ниже, чем в режиме  $1^x$ , и составляет как правило 10–20 пФ, а емкость измерительных входов VNA, приведенная к измерительным контактам пробника, уменьшается на два порядка. Длину соединительных проводов и площадь петли, образованной ими, необходимо минимизировать, а пробник подключать непосредственно к выводам объекта измерений (так минимизируется влияние индуктивностей и емкостей соединительных проводов на исследуемые характеристики).

2. Неидеальная ЧХ измерительных элементов: пробника напряжения и токового датчика. Ошибки измерений, обусловленные этим фактором, устраняются на этапе обработки измеренных характеристик. С этой целью дополнительно снимаются калибровочные характеристики измерительных элементов, которые по сути являются ЧХ их погрешностей. На рис. 3 показаны схемы измерений для определения калибровочных характеристик широкополосного токового датчика и пробника. Оно основано на измерении заведомо известных величин. Так, для калибровки токового датчика следует измерить какой-либо заведомо известный импеданс (на рис. 3,а таким импедансом выступает вход  $R$  VNA с сопротивлением  $R_R = 50$  Ом. Тогда калибровочная характеристика токового датчика определяется как

$$k_I(f) = \frac{1}{R_R Y_R(f)} = \frac{0,02}{Y_R(f)}, \quad (4)$$

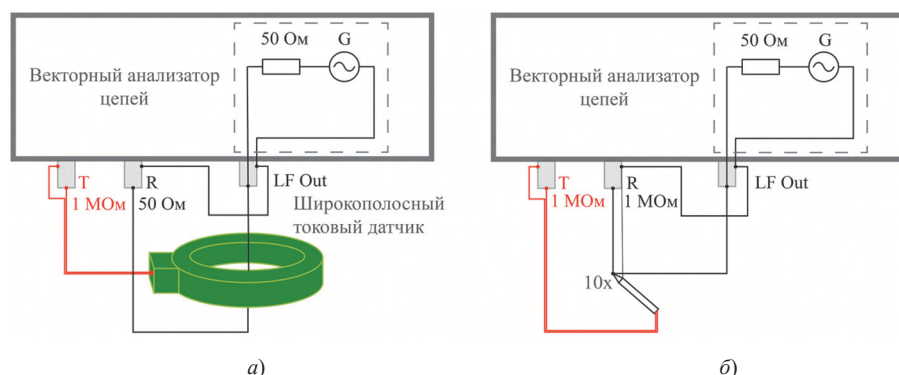
где  $Y_R(f)$  – измеренная частотная характеристика полной проводимости входа  $R$  VNA.

Калибровочная характеристика пробника определяется с помощью измерений по схеме рис. 3,б: напряжение на выходе источника измеряется одновременно обоими входами VNA, при этом ко входу  $R$  источник



**Рис. 2.** Схемы измерений частотных характеристик датчиков ЧР: а – схема измерения входной проводимости; б – схема измерения передаточной функции; в – схема измерения передаточного сопротивления

**Fig. 2.** Schemes for frequency responses measurement of PD sensors: а – input admittance measurement scheme; б – transfer function measurement scheme; в – transfer impedance measurement scheme



**Рис. 3.** Схемы измерений для определения калибровочных характеристик измерительных элементов: а – схема измерений для определения калибровочной характеристики широкополосного токового датчика; б – схема измерений для определения калибровочной характеристики пробника напряжения

**Fig. 3.** Measurement schemes for determining the calibration responses of measuring elements: а – measurement scheme for determining the calibration response of a wideband current sensor; б – measurement scheme for determining the calibration response of a voltage probe

подключается напрямую, а ко входу  $T$  – через калибруемый пробник. Измеренная таким образом ЧХ пересчитывается в калибровочную характеристику исследуемого пробника:

$$\underline{k}_V(f) = \frac{1}{A \underline{H}_{T/R}(f)}, \quad (5)$$

где  $\underline{H}_{T/R}(f)$  – ЧХ, измеренная по схеме рис. 3,б;  $A$  – коэффициент ослабления пробника.

В общем случае калибровочные характеристики измерительных элементов используются для корректировки результатов частотных обмеров следующим образом:

$$\underline{Y}(f) = \underline{Y}_{\text{изм}}(f) \frac{\underline{k}_T(f)}{A \underline{k}_V(f)}; \quad (6)$$

$$\underline{H}(f) = \underline{H}_{\text{изм}}(f) \frac{A_T \underline{k}_{UT}(f)}{A_R \underline{k}_{UR}(f)}; \quad (7)$$

$$\underline{Z}(f) = \underline{Z}_{\text{изм}}(f) \frac{A \underline{k}_V(f)}{\underline{k}_I(f)}, \quad (8)$$

где  $\underline{Z}(f)$  – ЧХ импеданса;  $\underline{Y}_{\text{изм}}(f)$ ,  $\underline{H}_{\text{изм}}(f)$ ,  $\underline{Z}_{\text{изм}}(f)$  – измеренные ЧХ;  $\underline{k}_{UT}(f)$ ,  $\underline{k}_{UR}(f)$ ,  $A_T$  и  $A_R$  – калибровочные характеристики и коэффициенты ослабления пробников, подключаемых к измерительным входам  $T$  и  $R$  VNA соответственно.

Если для измерения напряжения при частотном обмере пробники не используются, то в формулах (6)–(8) соответствующие калибровочные характеристики и коэффициенты ослабления принимаются равными единице.

На рис. 4 и 5 показаны калибровочные характеристики, корректирующие результаты измерений с помо-

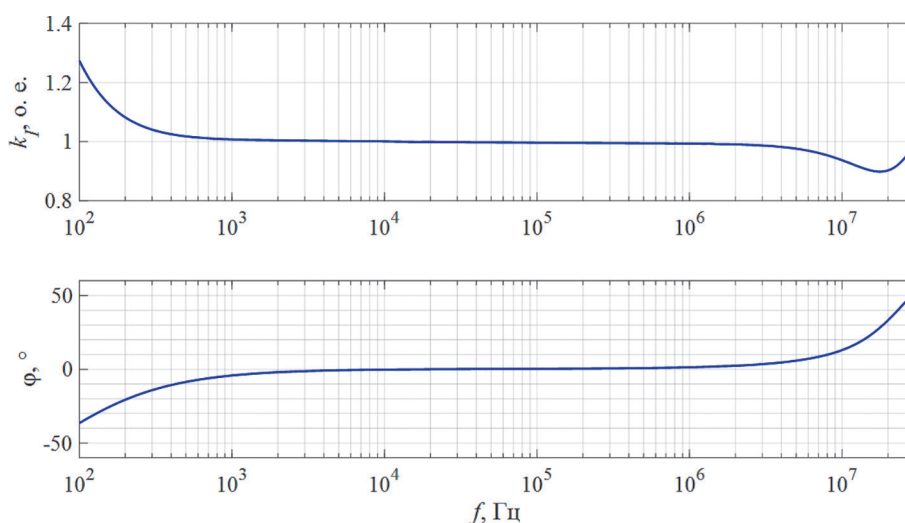


Рис. 4. Калибровочная характеристика широкополосного токового датчика *Pearson Current Monitor Model 2100*

Fig. 4. Calibration response of the Pearson Current Monitor Model 2100 wideband current sensor

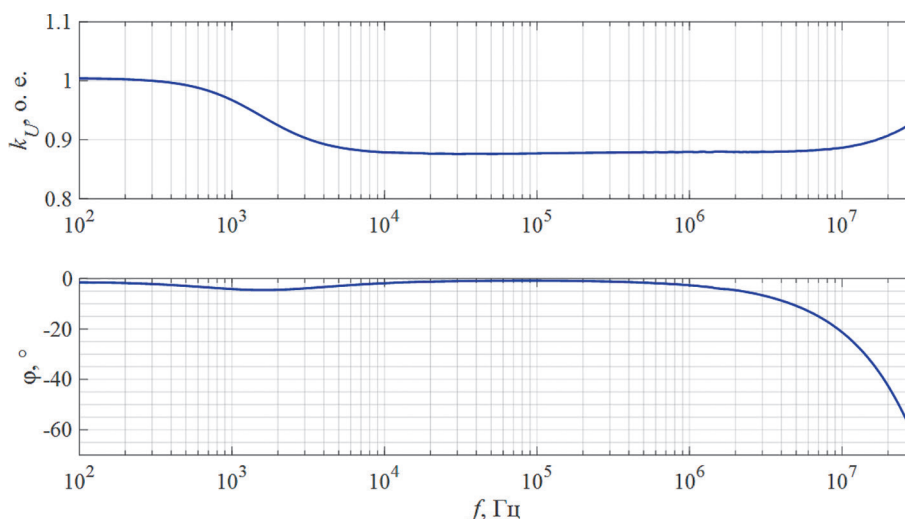


Рис. 5. Калибровочная характеристика пробника в режиме  $10^6$

Fig. 5. Calibration response of the probe in  $10^6$  mode

щью широкополосного токового датчика и пробника напряжения. Для некоторых частот поправка для амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) токового датчика превышает 20 %, а для фазочастотной – несколько десятков градусов. Для пробника напряжения поправка превышает 10 % в широком диапазоне частот. Очевидно, что неучет реальных характеристик измерительных элементов приводит к существенным ошибкам измерений.

**Экспериментальные частотные характеристики датчиков ЧР.** Для проведения исследований были изготовлены индуктивные датчики ЧР с различными параметрами. Основное внимание уделялось конструкции датчика, основанной на принципе действия трансформатора напряжения, первичная и вторичная обмотки которого выполнялись с разным числом витков  $w_1$  и  $w_2$  и наматывались на кольцевой ферритовый сердечник. Для изготовления датчиков использовались сердечники производства фирмы *TDK Electronics* (ранее *EPCOS*). Отметим, что можно использовать и отечественные аналоги. Результаты исследований для трех таких датчиков приведены в таблице. Датчики проектировались так, чтобы их рабочий частотный диапазон находился в области нескольких сотен кГц. На этих частотах феррит марки М33 обладает малыми потерями, а Т38 – значительными, что позволяет обеспечить быстрое затухание колебательного отклика

при подключении датчика к высокоомному входу измерительного прибора.

Были исследованы датчики на принципе высоко-частотного трансформатора тока (ВЧТТ), в том числе датчик производства одной из отечественных компаний (далее датчик № 4). Для этого датчика приведена только ЧХ передаточного сопротивления. Его первичная обмотка представляет собой короткий участок провода, падение напряжения на котором очень мало, и поэтому определение ЧХ входной проводимости по (1) и передаточной функции по (2) сопряжено с большими погрешностями.

На рис. 6 показаны измеренные ЧХ входной проводимости датчиков в режиме ХХ. Смена характера входного реактansa с индуктивного на емкостный происходит для указанных датчиков на частотах 450–600 кГц, что ограничивает сверху их рабочий частотный диапазон. Для датчика № 3 при его подключении к высокоомному входу измерительного прибора рабочие частоты находятся в диапазоне 100–300 кГц, на которых потери в феррите обеспечивают затухание сигнала за несколько периодов колебаний (рис. 7,а). На более высоких частотах отклик становится аperiodическим. Сигнал с датчика № 2 при его подключении к высокоомному измерительному входу затухает медленно (рис. 7,б), а его длительность превышает 200 мкс, что затрудняет измерение ЧР с высокой частотой повторения. Откли-

### Исследуемые датчики ЧР

#### Studied PD sensors

№ датчика	Марка материала феррита	Размеры сердечника	$w_1$	$w_2$
1	М33	$R41,8 \times 26,2 \times 12,5$	48	5
2	М33	$R41,8 \times 26,2 \times 12,5$	48	48
3	Т38	$R29,5 \times 19 \times 14,9$	12	12

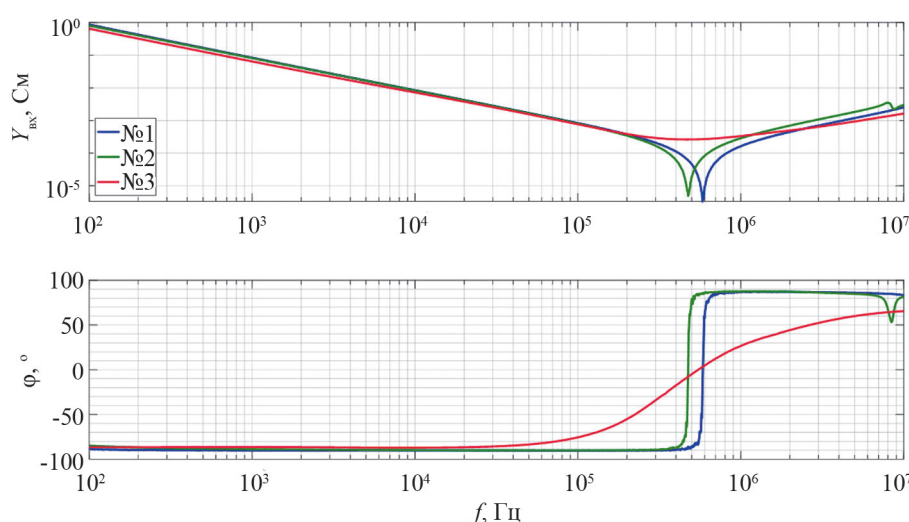
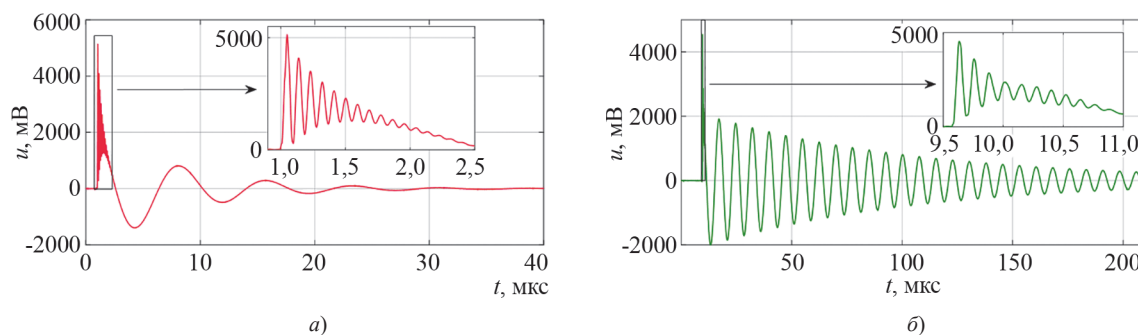


Рис. 6. Частотные характеристики входной проводимости датчиков ЧР в режиме ХХ

Fig. 6. Input admittance frequency responses of PD sensors in open-circuit mode





**Рис. 7.** Осциллограммы откликов с датчиков ЧР при подключении к высокоомному измерительному входу: *а* – отклик на ЧР с датчика № 3; *б* – отклик на ЧР с датчика № 2

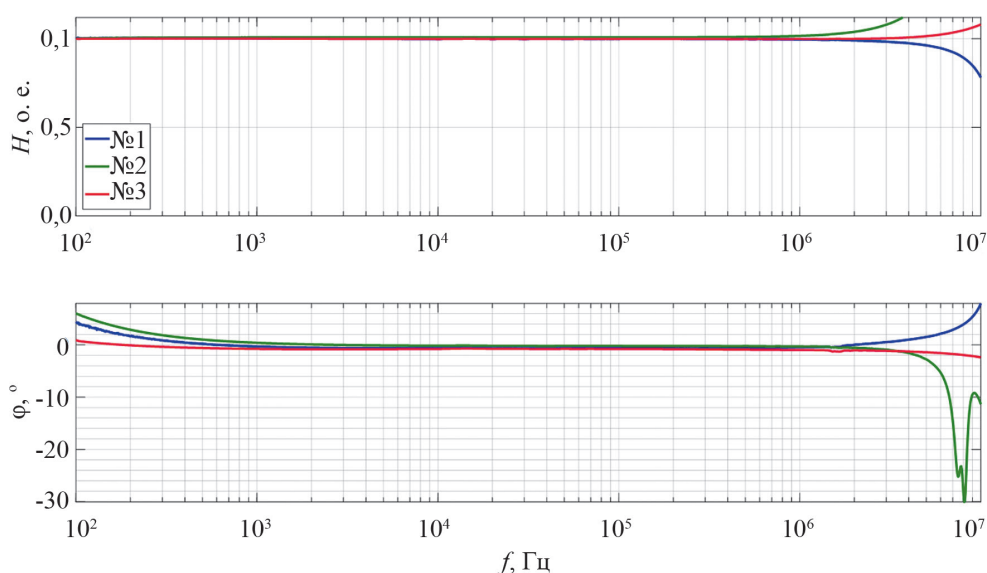
**Fig. 7.** Oscillograms of responses from PD sensors connected to a high-resistance measuring input: *a* – PD response from sensor № 3; *b* – PD response from sensor № 2

ки, показанные на рис. 7, содержат также быстро затухающую составляющую частотой 11 МГц (для датчика № 3) и 8 МГц (для датчика № 2), обусловленную колебаниями емкости измерительного кабеля через индуктивность рассеяния датчика. Эта высокочастотная составляющая может нести в себе дополнительную диагностическую информацию о скорости формирования ЧР, однако в рамках приемосдаточных испытаний оборудования на заводе-изготовителе она является избыточной и при подключении датчика к высокоомному измерительному входу высокочастотная составляющая отклика подавляется аппаратным или программным фильтром.

На рис. 8 показаны передаточные функции датчиков ЧР при подключении к высокоомному входу. Видно, что вплоть до единиц МГц трансформация сигнала с первичной обмотки датчиков во вторичную происходит практически без искажения.

На рис. 9 показаны ЧХ входной проводимости датчиков ЧР при их подключении к измерительному входу 50 Ом. Характер входного импеданса датчика № 1 остается преимущественно индуктивным вплоть до частоты 250 кГц, в то время как датчики № 2 и № 3, имеющие единичное отношение чисел витков первичной и вторичной обмоток, становятся резистивными уже на частотах порядка единиц кГц.

Таким образом, рассмотренные индуктивные датчики ЧР с единичным коэффициентом трансформации, подключенные к низкоомному входу измерительного прибора, фактически являются резистивными датчиками с гальванически развязанными от первичной цепи выходными зажимами. Для того чтобы индуктивный датчик, будучи подключенным к низкоомному измерительному входу, мог обеспечивать колебательный отклик, необходимо уменьшить его коэффициент трансформации так, чтобы сопротивление входа,



**Рис. 8.** Передаточные функции датчиков ЧР при подключении к измерительному входу 1 Мом (передаточная функция датчика № 1 поделена на коэффициент трансформации)

**Fig. 8.** Transfer functions of PD sensors connected to a 1 MΩ measuring input (the transfer function of sensor № 1 is divided by the transformer ratio)

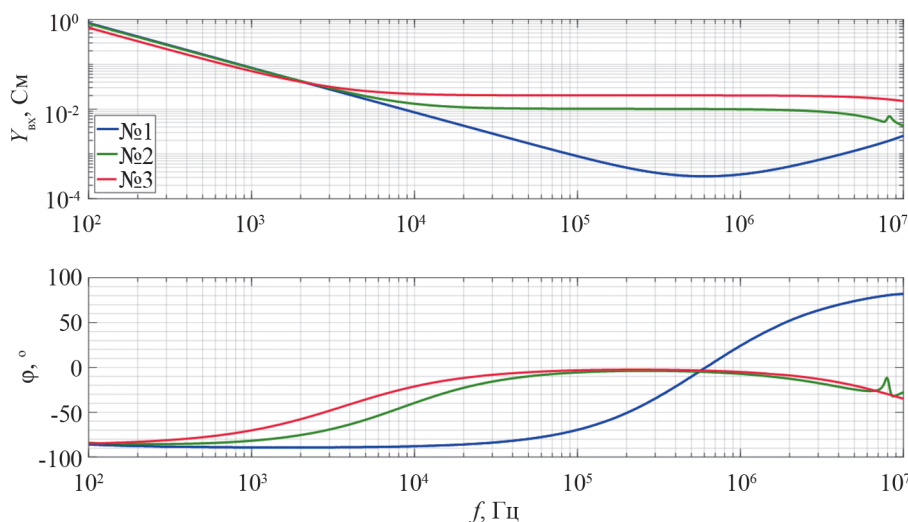


Рис. 9. Частотные характеристики входной проводимости датчиков ЧР в режиме нагрузки на 50 Ом

Fig. 9. Input admittance frequency responses of PD sensors in 50  $\Omega$  load mode

приведенное к стороне первичной обмотки датчика, было значительно выше индуктивного сопротивления намагничивания датчика на желаемой частоте отклика (как это сделано для датчика № 1).

На рис. 10 показаны ЧХ передаточного сопротивления датчика № 4 (на принципе ВЧТТ) при его подключении к измерительному входу 50 Ом. Для него амплитудно-частотная характеристика становится постоянной, начиная с частоты примерно 1 МГц, соответственно, это значение можно принять как нижнюю границу рабочего частотного диапазона указанного датчика. При этом видно, что за пределами диапазона 1–4 МГц в выходном напряжении датчика возникает фазовая ошибка, превышающая  $10^\circ$ , что приводит к заметному искажению формы регистрируемого сигнала.

При использовании датчиков на принципе трансформатора напряжения, подключенных к низкоомному

измерительному входу, частота отклика обычно оказывается весьма большой (более 1 МГц). При использовании высокоомного входа эта частота ниже, так как она определяется относительно большой индуктивностью намагничивания датчика. Активное сопротивление низкоомного входа шунтирует индуктивность намагничивания, и частота отклика начинает зависеть от малой индуктивности рассеяния датчика и индуктивности проводов и элементов колебательного контура.

На рис. 11 показаны передаточные функции датчиков ЧР при их подключении к измерительному входу 50 Ом. Видно, что сильное искажение напряжения первичной обмотки при его трансформации во вторичную обмотку начинается для всех датчиков на частотах выше 1 МГц. Степень этого искажения зависит главным образом от величины индуктивности рассеяния датчика, о величине которой можно судить по ЧХ вход-

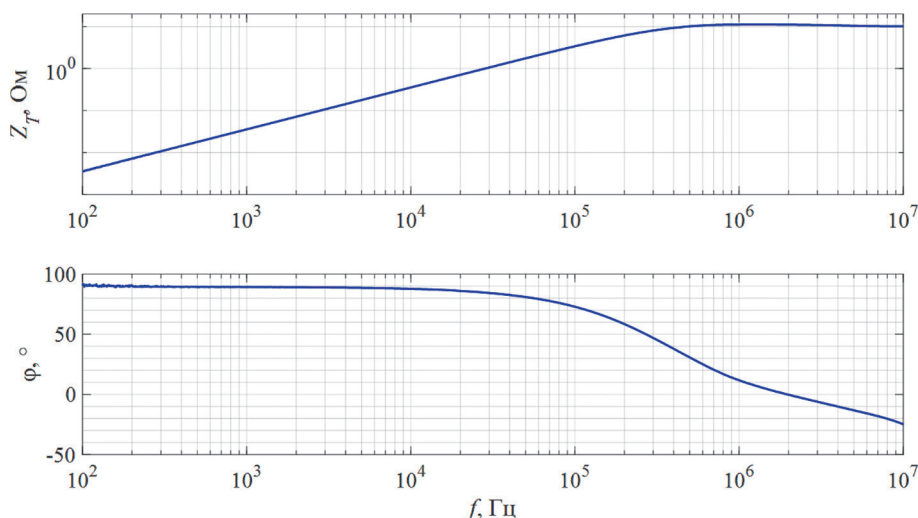
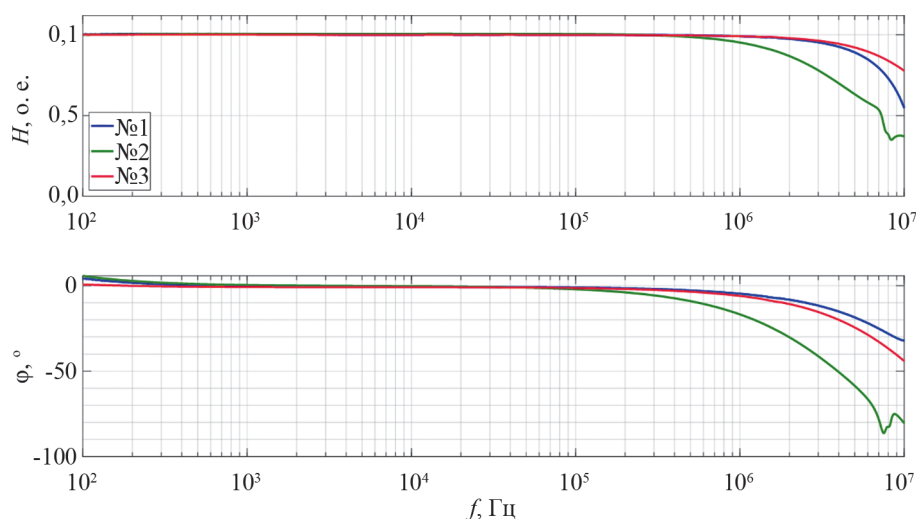


Рис. 10. Частотная характеристика передаточного сопротивления датчика № 4 при подключении к измерительному входу 50 Ом

Fig. 10. Transfer impedance frequency response of sensor № 4 connected to a 50  $\Omega$  measuring input



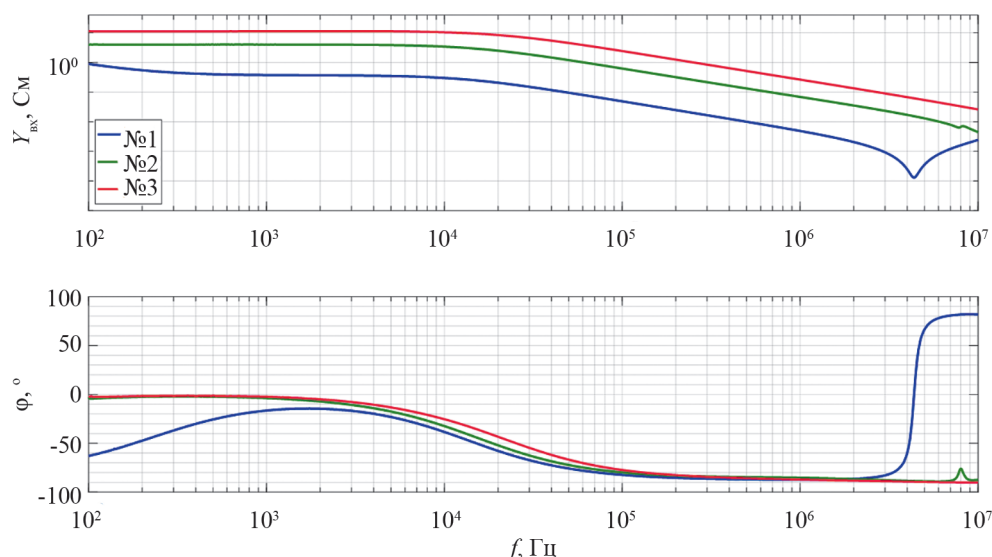
**Рис. 11.** Передаточные функции датчиков ЧР при подключении к измерительному входу 50 Ом (передаточная функция датчика № 1 поделена на коэффициент трансформации)

**Fig. 11.** Transfer functions of PD sensors connected to a 50  $\Omega$  measuring input (the transfer function of sensor № 1 is divided by the transformer ratio)

ной проводимости в режиме КЗ (рис. 12). На частотах порядка сотен кГц абсолютное значение характеристики практически полностью определяется индуктивностью рассеяния. Датчик № 3, имеющий наибольшую входную проводимость в этой частотной области, характеризуется наименьшей индуктивностью рассеяния. Он же отличается наиболее ровной передаточной функцией при подключении к измерительному входу 50 Ом. Датчик № 1 обладает наибольшей индуктивностью рассеяния, однако ее влияние в значительной степени снижается из-за малого коэффициента трансформации: сопротивление 50 Ом в результате приведения к стороне первичной обмотки увеличивается почти на два порядка, в результате чего относительное падение напряжения на индуктивности рассеяния уменьшает-

ся, а начало снижения абсолютного значения передаточной функции сдвигается в область более высоких частот.

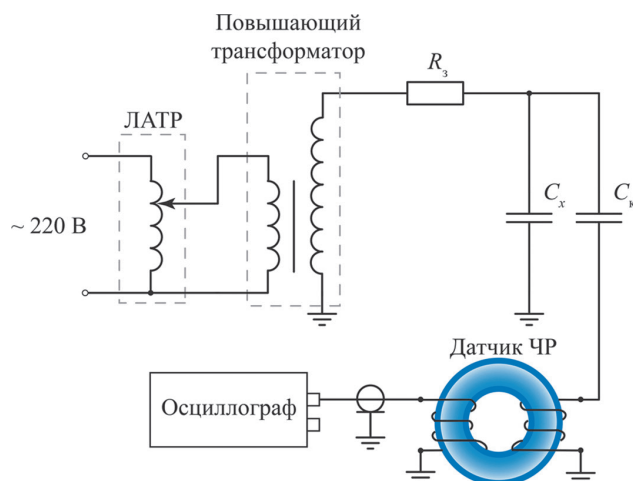
**Экспериментальные частотные характеристики оборудования схем измерения ЧР.** Применение традиционной схемы замещения испытательной установки (рис. 13) без учета частотной зависимости ее параметров для интерпретации результатов измерений сигналов ЧР электрическим методом может приводить к значительным ошибкам при оценке как чувствительности измерений, так и ожидаемых параметров отклика измерительной системы. Покажем это на примере частотных зависимостей параметров защитного резистора, соединительного конденсатора и объекта испытаний.



**Рис. 12.** Частотные характеристики входной проводимости датчиков ЧР в режиме КЗ

**Fig. 12.** Input admittance frequency responses of PD sensors in short-circuit mode





**Рис. 13.** Принципиальная схема измерений ЧР электрическим методом:  $R_3$  – защитный резистор;  $C_x$  – объект испытаний;  $C_k$  – соединительный конденсатор

**Fig. 13.** Circuit diagram of PD measurements by electrical method:  $R_3$  – protective resistor;  $C_x$  – test object;  $C_k$  – coupling capacitor

Одной из функций защитного резистора  $R_3$  является обеспечение большого импеданса между повышающим трансформатором и объектом испытаний на высоких частотах, чтобы ток ЧР не мог замыкаться через паразитную емкость источника и практически полностью замыкался через соединительный конденсатор  $C_k$ , в нейтральный вывод которого обычно включается датчик ЧР [8, Приложение Б]. Емкость соединительного конденсатора при этом выбирается достаточно большой, чтобы обеспечить замыкание большей части тока ЧР через датчик.

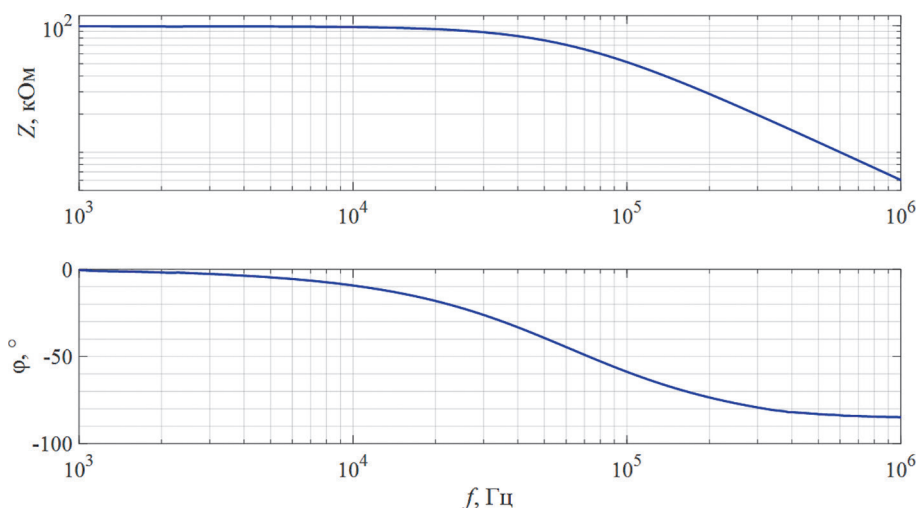
На рис. 14 показана измеренная ЧХ входного импеданса резистора марки С5 номинальным сопротивлением 100 кОм. На характерных частотах переходного процесса при возникновении ЧР (100 кГц и выше) рассматриваемый резистор имеет емкостный характер

входного сопротивления, вследствие чего ток ЧР будет частично замыкаться через емкость источника высокого напряжения (ВН). В результате чувствительность измерений при подключении датчика в нейтраль соединительного конденсатора снизится. Кроме того, влияние емкости источника ВН приведет еще и к тому, что эквивалентная емкость схемы в переходном процессе увеличится, а частота отклика измерительной системы от ЧР снизится. Другой важной функцией защитного резистора является фильтрация высокочастотных помех, создаваемых источником ВН [8]. Очевидно, что емкостный характер импеданса защитного резистора на характерных частотах препятствует выполнению этой функции.

На рис. 15 показана измеренная частотная характеристика входной проводимости высоковольтного конденсатора ДМК с номинальным напряжением 190 кВ, применяющегося в качестве соединительного в некоторых заводских испытательных лабораториях. Видно, что на частоте 2,3 МГц происходит смена характера входного импеданса с емкостного на индуктивный, что может оказывать сильное влияние на чувствительность и характеристики измерительных систем, работающих с откликами от ЧР в соответствующем частотном диапазоне.

На рис. 16 показана измеренная ЧХ входной проводимости соединительной муфты однофазного литого токопровода, для которой проводились измерения характеристик ЧР. Смена характера входного импеданса с емкостного на индуктивный происходит уже на частоте 1,3 МГц, в результате чего искажается форма отклика измерительной системы, а также снижается чувствительность измерений.

Отметим, что наиболее сильно эффекты, связанные со сложной ЧХ входного импеданса оборудования и объектов измерения ЧР электрическим методом, проявляются при использовании в системах измерений



**Рис. 14.** Частотная характеристика входного импеданса резистора С5 100 кОм

**Fig. 14.** Input admittance frequency response of the resistor C5 100 kΩ

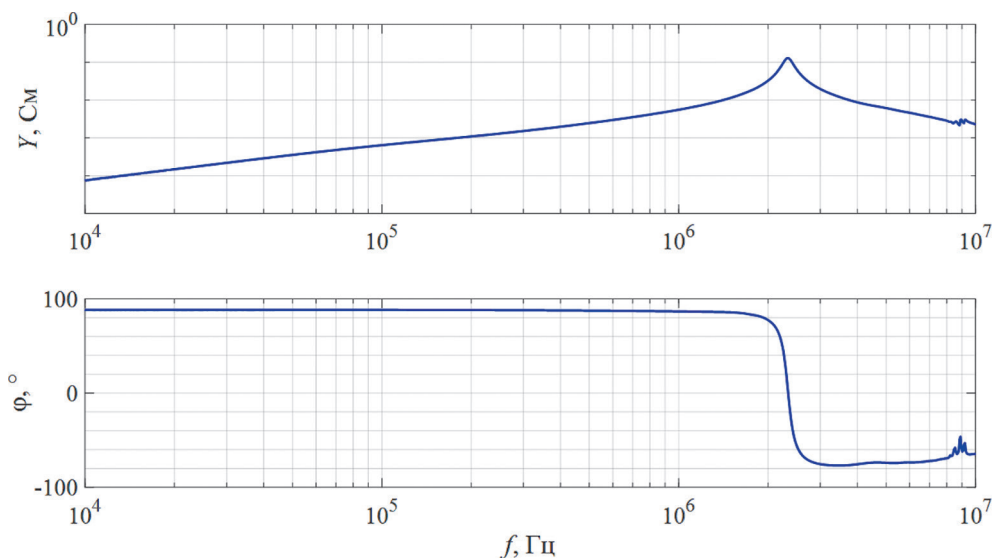


Рис. 15. Частотная характеристика входной проводимости конденсатора ДМК 190 кВ

Fig. 15. Input admittance frequency response of the capacitor DMK 190 kV

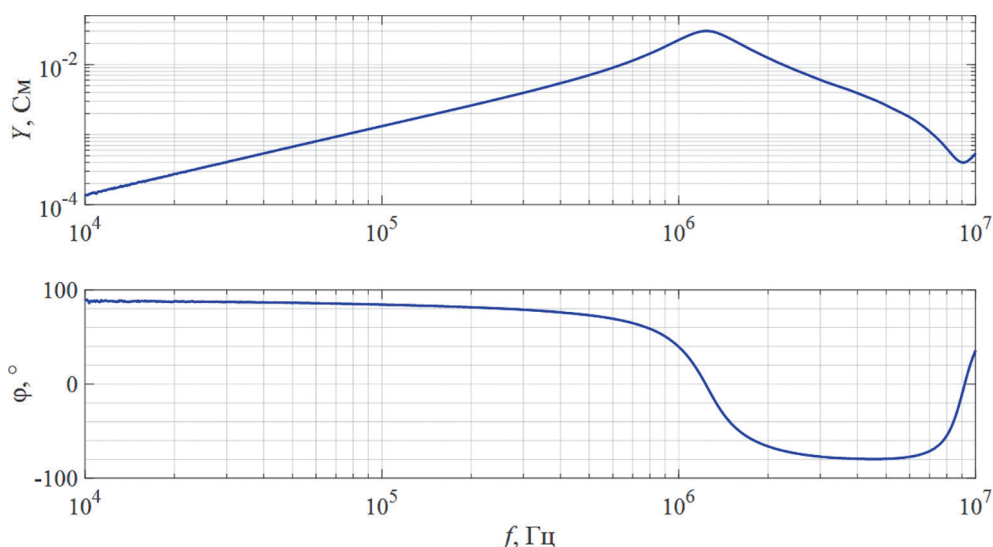


Рис. 16. Частотная характеристика входной проводимости соединительной муфты однофазного литого токопровода

Fig. 16. Input admittance frequency response of the connecting coupling of single-phase cast resin insulated busbar

датчиков, обеспечивающих отклик на частотах выше 1 МГц, в особенности датчиков ЧР на принципе ВЧТТ. Это обстоятельство является одним из недостатков таких систем.

**Выводы.** Сформулированы методические основы измерения ЧХ датчиков ЧР и оборудования испытательных установок и их последующей корректировки, основанной на учете частотной зависимости параметров элементов измерительной системы.

С помощью ЧХ входных проводимостей датчиков можно определять их рабочий частотный диапазон. На примере датчика, изготовленного на сердечнике из феррита марки Т38, подключаемого к высокоомному входу измерительного прибора, показано, что можно управлять затуханием отклика на сигнал ЧР путем выбора

материала сердечника, обеспечивающего достаточные потери в рабочем частотном диапазоне. Это позволяет регулировать длительность отклика, что актуально при построении амплитудно-фазовых диаграмм ЧР с высокой частотой повторения.

Индуктивные датчики ЧР на принципе трансформатора напряжения с равным числом витков обмоток функционируют при подключении к низкоомному входу измерительного прибора как резистивные датчики, но при этом имеют гальваническую развязку выходных зажимов от первичной цепи. Обеспечение колебательного отклика при использовании индуктивных датчиков совместно с низкоомным измерительным входом достигается снижением коэффициента трансформации до значения, при котором индуктивность намагничива-

ния датчика не шунтируется входным сопротивлением измерительного прибора.

Датчики на принципе ВЧТТ имеют падающую фазочастотную характеристику, что ограничивает их рабочий частотный диапазон. Это необходимо учитывать при использовании таких датчиков.

При использовании датчиков на принципе трансформатора напряжения с подключением к низкоомному измерительному входу для обеспечения отсутствия ослабления и искажения сигнала необходимо минимизировать индуктивность рассеяния датчика. Конструктивно это можно обеспечить чередующейся намоткой его первичной и вторичной обмоток.

Показано, что при проектировании испытательных установок для измерения ЧР электрическим методом необходимо учитывать частотные зависимости параметров оборудования в рабочем частотном диапазоне измерительной системы.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00934, <https://rscf.ru/project/23-29-00934>.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коробейников С.М., Овсянников А.Г. Физические механизмы частичных разрядов. Новосибирск: НГТУ, 2021, 266 с.
2. Вдовико В.П. Частичные разряды в диагностировании высоковольтного оборудования. Новосибирск: Наука, 2007, 155 с.
3. Русов В.А. Измерение частичных разрядов в изоляции высоковольтного оборудования. Екатеринбург: УрГУПС, 2011, 370 с.
4. CIGRE Technical Brochure No. 366. Guide for Partial Discharge Measurements in Compliance to IEC 60270, 2008, 56 p.
5. CIGRE Technical Brochure No. 662. Guidelines for Partial Discharge Detection Using Conventional (IEC 60270) and Unconventional Methods, 2016, 115 p.
6. CIGRE Technical Brochure No. 676. Partial Discharges in Transformers, 2017, 162 p.
7. IEC 60270:2000+AMD1:2015 CSV. High-Voltage Test Techniques – Partial Discharge Measurements, 2015, 226 p.
8. ГОСТ Р 55191-2012 (МЭК 60270:2000). Методы испытаний высоким напряжением. Измерения частичных разрядов. М.: Стандартинформ, 2014, 47 с.
9. Qiong F. et al. New Type of Pulse Current Sensors for on-Line Partial Discharge Monitoring. – 7<sup>th</sup> International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, 2003, pp. 298–301, DOI: 10.1109/ICPADM.2003.1218411.
10. Siddiqui B.A., Pakonen P., Verho P. Novel Sensor Solutions for On-line PD Monitoring. – 23<sup>rd</sup> International Conference on Electricity Distribution, Lyon, France, 2015, p. 1200.
11. Siddiqui B.A., Pakonen P., Verho P. Novel Inductive Sensor Solutions for On-line Partial Discharge and Power Quality Monitoring. – IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2017, vol. 70, No. 1, pp. 209–216, DOI: 10.1109/TDEI.2016.005908.
12. Paophan B., Kunakorn A., Yutthagowith P. Partial Discharge Measurement Based on an Inductive Mode Air-Core Sensor. – Journal of Electrical Engineering & Technology, 2020, vol. 15, pp. 773–785, DOI: 10.1007/s42835-020-00376-y.

13. Klüss J.V., Elg A.P., Wingqvist C. High-Frequency Current Transformer Design and Implementation Considerations for Wideband Partial Discharge Applications. – IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, vol. 70, DOI: 10.1109/TIM.2021.3052002.

14. Fritsch M., Wolter M. High-Frequency Current Transformer Design and Construction Guide. – IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, vol. 71, DOI: 10.1109/TIM.2022.3177189.

15. Qian S. et al. BaTiO<sub>3</sub>-Refined NiCuZn Ferrites Towards Enhanced Pulse Detection Sensitivity for a High-Frequency Current Transformer. – Journal of Electronic Materials, 2023, vol. 52, iss. 1, pp. 583–592, DOI: 10.1007/s11664-022-10029-7.

Поступила в редакцию [28.02.2023]  
Принята к публикации [25.05.2023]

#### Авторы:



**Жуйков Антон Владимирович** – кандидат техн. наук, инженер кафедры «Техника и электрофизика высоких напряжений», Национальный исследовательский университет «МЭИ» (НИУ «МЭИ»), Москва, Россия.



**Колпакова Полина Андреевна** – инженер кафедры «Техника и электрофизика высоких напряжений», НИУ «МЭИ», Москва, Россия.



**Матвеев Даниил Анатольевич** – научный сотрудник кафедры «Техника и электрофизика высоких напряжений», НИУ «МЭИ», Москва, Россия.



**Фролов Михаил Васильевич** – аспирант, инженер кафедры «Техника и электрофизика высоких напряжений», НИУ «МЭИ», Москва, Россия.



**Хренов Сергей Иванович** – кандидат техн. наук, доцент, доцент кафедры «Техника и электрофизика высоких напряжений», НИУ «МЭИ», Москва, Россия.

# Studying the Frequency Characteristics of Inductive Sensors Used in Partial Discharge Measurement Circuits

**ZHUYKOV Anton V.** (National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russia) – Engineer of the High Voltage Engineering and Electrophysics Dept., Cand. Sci. (Eng.).

**KOLPAKOVA Polina A.** (National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russia) – Engineer of the High Voltage Engineering and Electrophysics Dept.

**MATVEEV Daniil A.** (National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russia) – Researcher of the High Voltage Engineering and Electrophysics Dept.

**FROLOV Mihail V.** (National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russia) – Postgraduate Student, Engineer of the High Voltage Engineering and Electrophysics Dept.

**HRENOV Sergey I.** (National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russia) – Docent of the High Voltage Engineering and Electrophysics Dept., Cand. Sci. (Eng.), Docent.

*The results obtained from measuring the characteristics of partial discharges (PD) inside of electrical equipment insulation using the electrical method should be analyzed with taking into account the frequency responses of both the test facility and measurement circuit components, especially the sensors that produce the response to PD signals. The article sets out methodical principles of the approach to determining these frequency responses, which minimizes the measurement errors. The frequency responses of inductive sensors of two kinds – based on the principles of current and voltage transformer – are given and analyzed, which opens the possibility to design sensors for particular measurement objectives. For sensors based on the current transformer principle it is shown that the decreasing pattern of the phase-frequency response limits their operation frequency range. For sensors based on the voltage transformer principle the influence of the type of ferrite core and the measuring device input impedance on the frequency responses is analyzed. It is shown that by selecting the core material it is possible to control the response duration and provide separate recording of frequently repeating discharges. The condition for ensuring an oscillatory pattern of the response from an inductive sensor connected to the measuring device low-impedance input is determined. Recommendations on the sensors design to reduce distortion and attenuation of signals are given.*

**Key words:** partial discharges, inductive sensors, high-voltage testing, frequency responses, electrical method of measurements

*The study was financially supported by the Russian Science Foundation, grant no. 23-29-00934, <https://rscf.ru/project/23-29-00934>.*

## REFERENCES

1. **Korobeynikov S.M., Ovsyannikov A.G.** *Fizicheskie mekhanizmy chastichnyh razryadov* (Physical Mechanisms of Partial Discharges). Novosibirsk: NGTU, 2021, 266 p.
2. **Vdoviko V.P.** *Chastichnye razryady v diagnostirovaniy vysokovol'tnogo oborudovaniya* (Partial Discharges in the Diagnosis of High-Voltage Equipment). Novosibirsk: Nauka, 2007, 155 p.
3. **Rusov V.A.** *Izmerenie chastichnyh razryadov v izolyatsii vysokovol'tnogo oborudovaniya* (Measurement of Partial Discharges in the Insulation of High-Voltage Equipment). Ekaterinburg: UrGUPS, 2011, 370 p.
4. **CIGRE Technical Brochure No. 366.** Guide for Partial Discharge Measurements in Compliance to IEC 60270, 2008, 56 p.
5. **CIGRE Technical Brochure No. 662.** Guidelines for Partial Discharge Detection Using Conventional (IEC 60270) and Unconventional Methods, 2016, 115 p.
6. **CIGRE Technical Brochure No. 676.** Partial Discharges in Transformers, 2017, 162 p.
7. **IEC 60270:2000+AMD1:2015 CSV.** High-Voltage Test Techniques – Partial Discharge Measurements, 2015, 226 p.
8. **GOST R 55191-2012 (MEK 60270:2000).** *Metody ispytaniy vysokim napryazheniem. Izmereniya chastichnyh razryadov* (High Voltage Test Techniques. Partial Discharge Measurements). M.: Standartinform, 2014, 47 p.
9. **Qiong F. et al.** New Type of Pulse Current Sensors for on-Line Partial Discharge Monitoring. – 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, 2003, pp. 298–301, DOI: 10.1109/ICPADM.2003.1218411.
10. **Siddiqui B.A., Pakonen P., Verho P.** Novel Sensor Solutions for On-line PD Monitoring. – 23<sup>rd</sup> International Conference on Electricity Distribution, Lyon, France, 2015, p. 1200.
11. **Siddiqui B.A., Pakonen P., Verho P.** Novel Inductive Sensor Solutions for On-line Partial Discharge and Power Quality Monitoring. – IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2017, vol. 70, No. 1, pp. 209–216, DOI: 10.1109/TDEI.2016.005908.
12. **Paophan B., Kunakorn A., Yutthagowith P.** Partial Discharge Measurement Based on an Inductive Mode Air-Core Sensor. – Journal of Electrical Engineering & Technology, 2020, vol. 15, pp. 773–785, DOI: 10.1007/s42835-020-00376-y.
13. **Klüss J.V., Elg A.P., Wingqvist C.** High-Frequency Current Transformer Design and Implementation Considerations for Wideband Partial Discharge Applications. – IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, vol. 70, DOI: 10.1109/TIM.2021.3052002.
14. **Fritsch M., Wolter M.** High-Frequency Current Transformer Design and Construction Guide. – IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, vol. 71, DOI: 10.1109/TIM.2022.3177189.
15. **Qian S. et al.** BaTiO<sub>3</sub>-Refined NiCuZn Ferrites Towards Enhanced Pulse Detection Sensitivity for a High-Frequency Current Transformer. – Journal of Electronic Materials, 2023, vol. 52, iss. 1, pp. 583–592, DOI: 10.1007/s11664-022-10029-7.

Received [28.02.2023]

Accepted [25.05.2023]