



Недомолвки в теории и недостатки в практике регистрации частичных разрядов

А.Г. Овсянников

Доклад на 12 –й ежегодной конференция «Методы и средства контроля изоляции высоковольтного оборудования», г. Пермь, 26-27 февраля 2015 г.

То что дальше – это дополнения в доклад по феноменологии ЧР от 23.01.2008 г.





1. Недомолвки теории

1.1 О названии главной энергетической характеристики ЧР

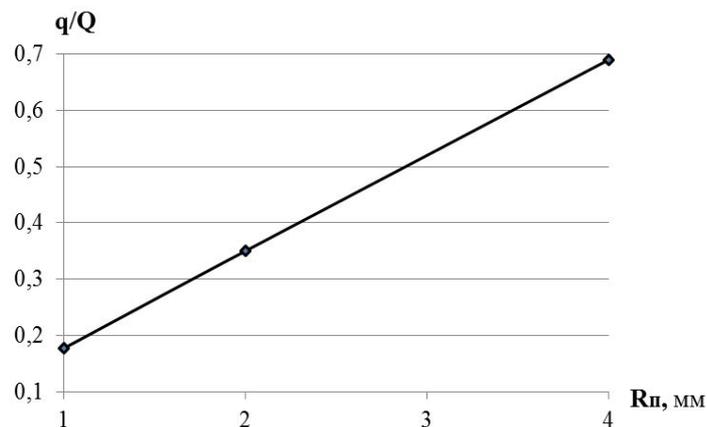
«Кажущийся» заряд – не самое подходящее определение измеряемого заряда ЧР. По сути – это заряд от тока, протекающего во внешней цепи или заряд, **индуктированный** на внешних электродах. Это определение понятное всем электротехникам и физикам. И оно **не новое!** Оно использовалось, например, автором [1], но, думаю, и раньше звучало

1. I.V. McCalister. Electric Fields and Electric Insulation // IEEE Trans. on DEIS, 2002. – v.9. – N5. – С. 672 – 694.

1.2 О соотношении кажущегося и истинного зарядов ЧР



ГОСТ 20074-83 и МЭК 60270 не оставляют никаких надежд на знание истинного заряда ЧР. Обидно!

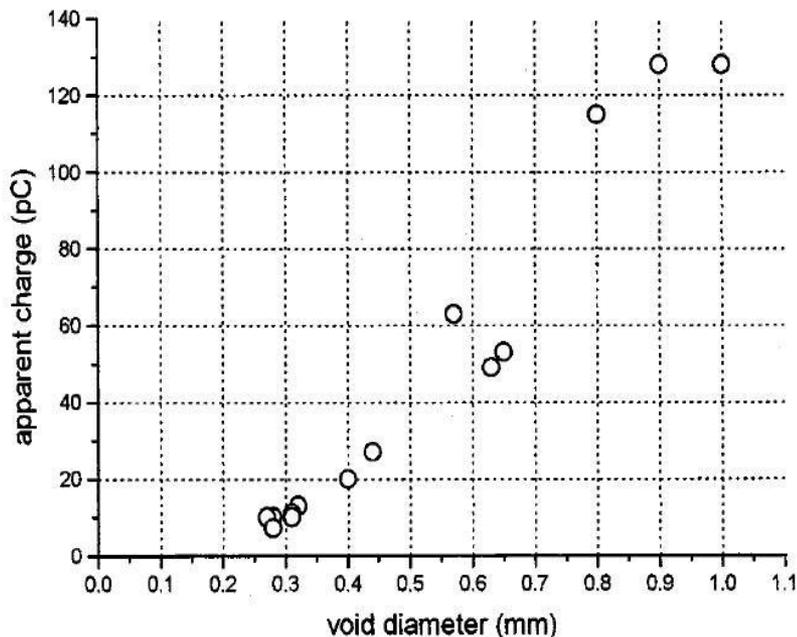


Хорошо ещё, что действительно опасные ЧР в **грубых** дефектах имеют кажущийся заряд более или менее близкий по значению к истинному заряду [2].

Только поэтому испытания с измерением ЧР имеют смысл. Они акцентированы на обнаружение грубых дефектов!

2. Овсянников А.Г., Коробейников С.М., Вагин Д.В. Связь кажущегося и истинного зарядов частичных разрядов // Электричество. – 2014. – № 8. – С.37 – 43.

1.3 Кажущийся заряд ЧР и размер дефекта



При изменении диаметра в 3 раза, кажущийся заряд возрос в 13 раз!

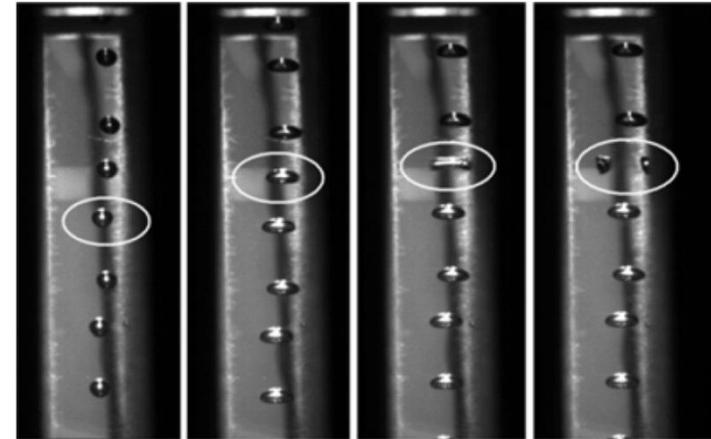
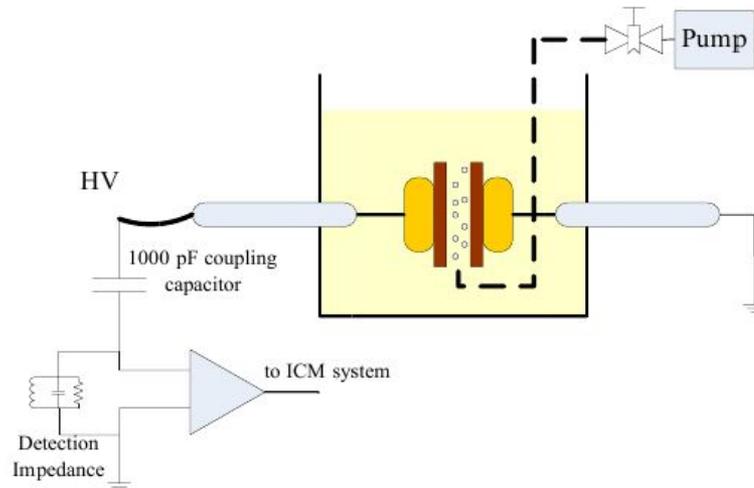
Непропорциональный рост объясняется, ростом истинного заряда (≥ 4 раза) и изменением соотношения кажущегося к истинному заряду (≈ 3 раза)

Зависимость кажущегося заряда ЧР от диаметра поры в эпоксидной смоле [3]

3. V. Swinka, F. R. Robert. Imaging of voids in dielectric materials by x-ray induced partial discharge // Review of scientific instruments, 2002. – v. 73. – N 3. – С. 1288 – 1292.

Изящная методика!

1.3 – продолжение: кажущийся заряд ЧР и размер пузырьков в масляном канале

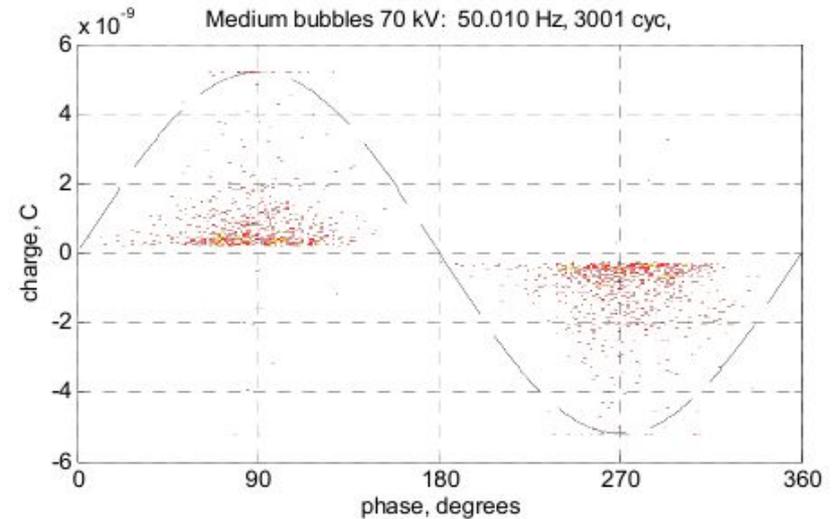
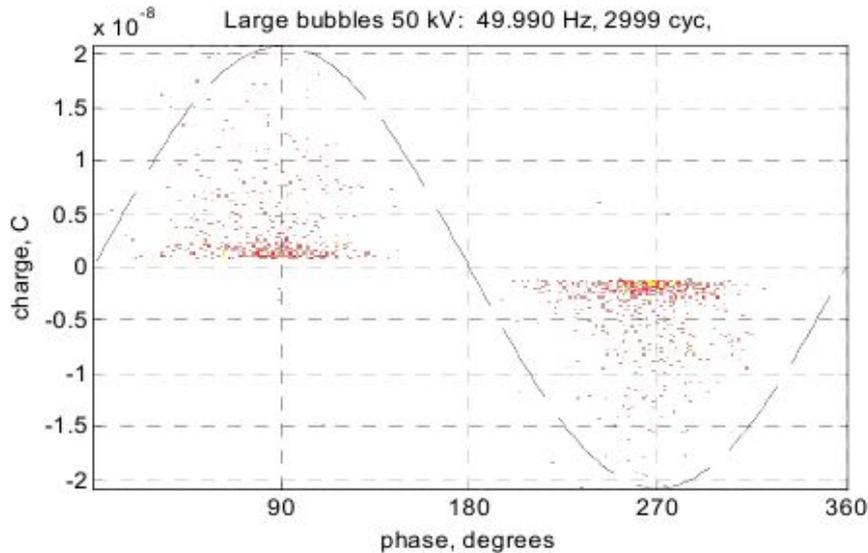


Объем пузырей	D, мм	q, нКл
≈ 100 мкл	$\approx 5,8$	$1 \div 20$
≈ 30 мкл	$\approx 3,9$	$0,2 \div 5$
≈ 5 мкл	$\approx 2,1$	$0,2 \div 2$

Вывод: при норме 300 пКл мы чувствуем пузыри диаметром > 2 мм

4 M. G. Niasar, H. Edin, X. Wang and R. Clemence. Partial discharge characteristics due to air and water vapor bubbles in oil / Proc. of XVII ISH, Hannover, 2011. – Paper D – 067.

1.4 Как объяснить симметричность АФД относительно амплитуд?



Теоретически такого быть не должно. И в физических моделях дефектов «Димрус» нет таких АФД

4 M. G. Niasar, H. Edin, X. Wang and R. Clemence. Partial discharge characteristics due to air and water vapor bubbles in oil / Proc. of XVII ISH, Hannover, 2011. – Paper D – 067.



1.5 Кажущийся заряд ЧР в изоляции конденсаторного типа

Неопределённость усиливается многократно, если рассматривать формирование сигналов ЧР в изоляции конденсаторного типа, когда очаг ЧР находится в слое изоляции **между уравнительными обкладками.**

Даже, если бы имели непосредственный доступ к этим обкладкам, то и тогда мы имели бы дело с кажущимся зарядом. А в реальности мы контролируем сигналы только во внешней цепи и поэтому измеряем заряд «кажущийся в квадрате» [4], точнее, нам кажется что ЧР нет, а они есть, но «спрятались»!

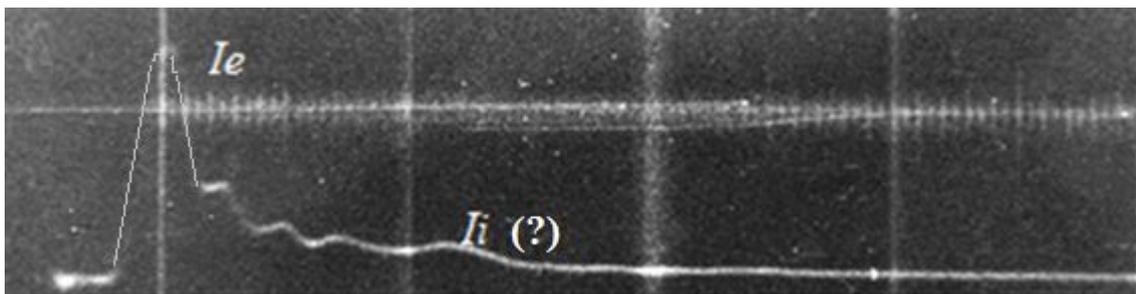
5. Овсянников А.Г. Оценка состояния изоляции оборудования по интенсивности частичных разрядов // Энергетик, 2001, № 5. – С. 35 – 37.

(Скоро будет в «ЭнергоЭксперте» наша статья о том же, но обновлённая)

1.6 С какими зарядами связан ток ЧР?

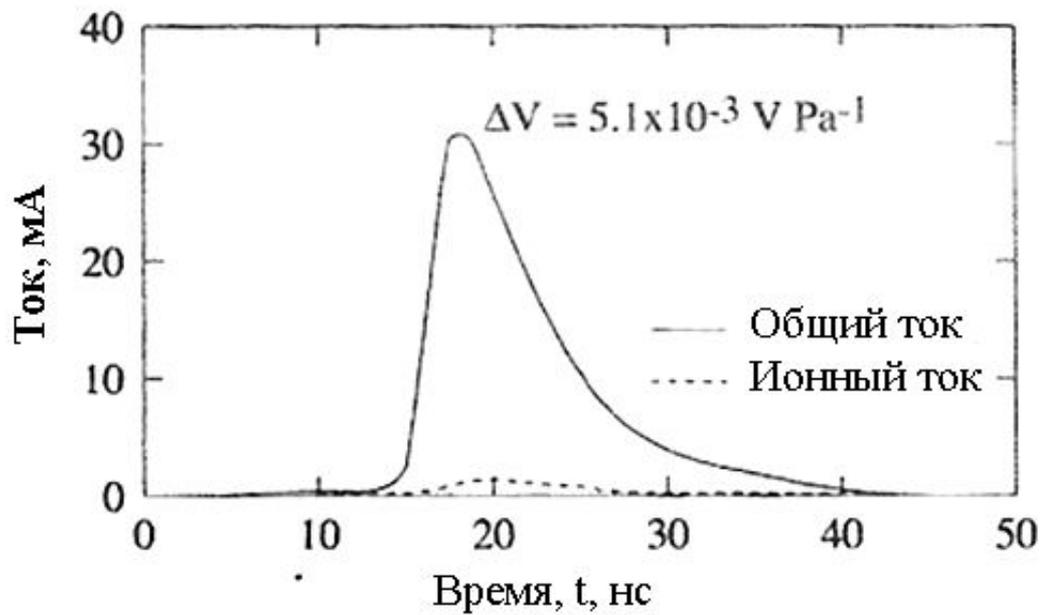


Заряд ЧР – это сумма зарядов по модулю электронов и ионов. Заряд мы определяем интегрированием импульсного тока или по амплитуде сигнала и градуировочному коэффициенту. Но у электронов скорость дрейфа на два порядка больше, чем у ионов, и, соответственно, электронная составляющая тока ЧР на два порядка больше ионной составляющей [6, 7]. Поэтому мы всегда регистрируем только **половину заряда!** В принципе, это не страшно, только зачем тогда требовать от регистраторов какой-то точности?



Осциллограмма тока ЧР в полости толщиной 1 мм; масштаб времени 20 нс/дел.

1.6 - продолжение



Расчётные формы тока в промежутке 0,5 мм и атмосферном давлении, при большом перенапряжении и большой плотности объёмного заряда [6]

6. R. Bartnikas. Partial Discharges, Their Mechanism, Detection and Measurement // IEEE Trans. on DEIS, 2002. – v.9. – No5. – С. 763 – 808.
7. Овсянников А.Г. Пространственно – временные и энергетические характеристики частичных разрядов в воздушных полостях твёрдых диэлектриков // Научный вестник НГТУ. – 1999. - № 2 (5). – С.123 –136.

1.7 А какова реальная длительность ЧР?



Она соответствует длительности фронта. По мере развития техники длительность фронта ЧР «снизилась» от десятых долей мкс до десятых долей нс, т.е. на три порядка!

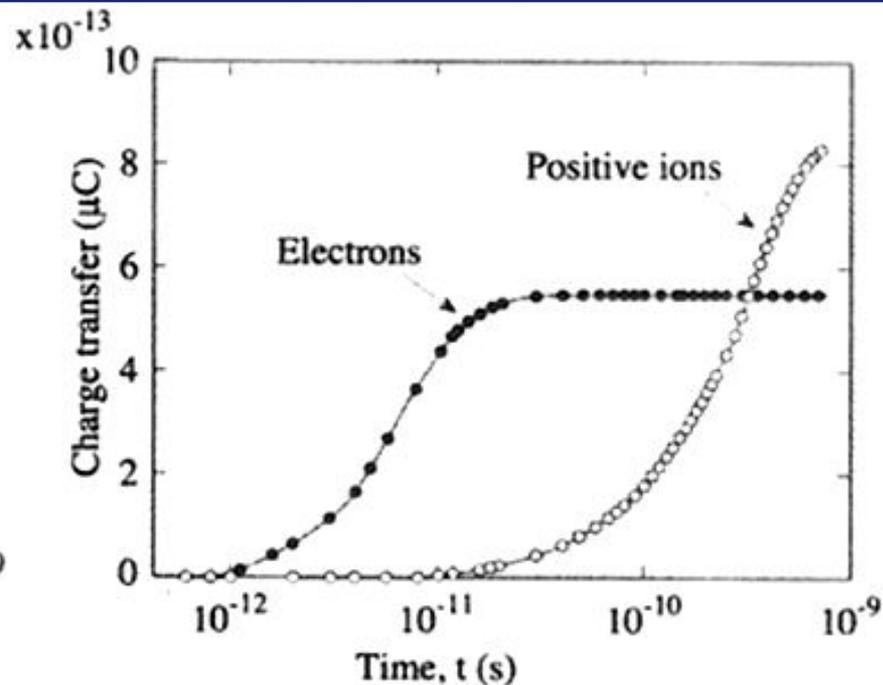
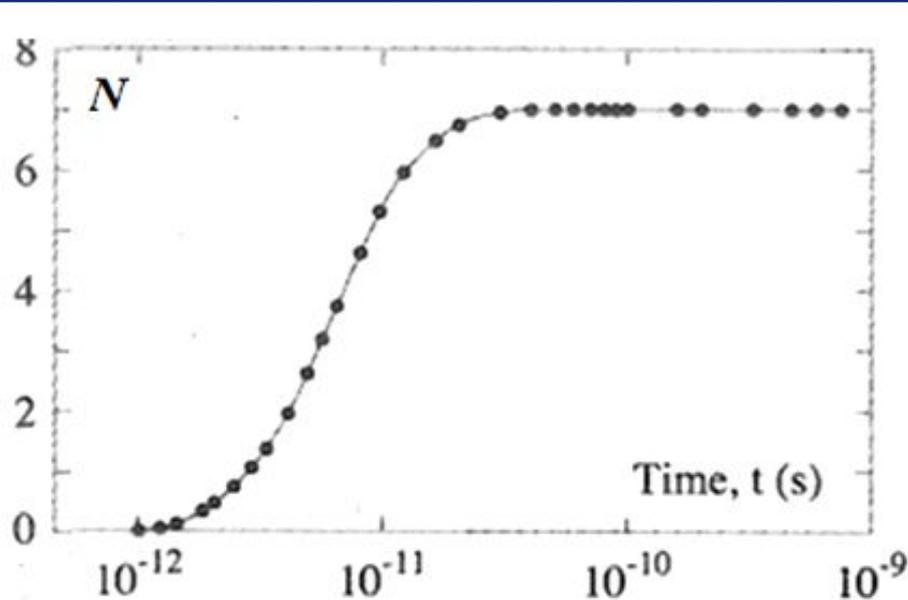
С позиций физического механизма, понятного для газовых полостей, длительность фронта импульса тока ЧР определяется скоростью дрейфа электронов в тех полях, которые имеют место в момент образования ЧР.

$$v_e = \mu_e E^m$$

По минимуму ($E = 45$ кВ/см при $d = 1$ мм) это 10^7 см/с [7].

Если после оседания заряда, поле в полости падает настолько, что ЧР прекращается, то для полостей диаметров (0,01 – 1) мм время дрейфа электронов, равное длительности фронта должно составлять (0,02 – 10) нс.

1.7 - продолжение



Число актов ионизации и перенос зарядов во времени при ЧР в полости диаметром 5 мкм и напряжённости поля 270 кВ/см [6]

1.8 Откуда берутся начальные электроны? Каково запаздывание ЧР?



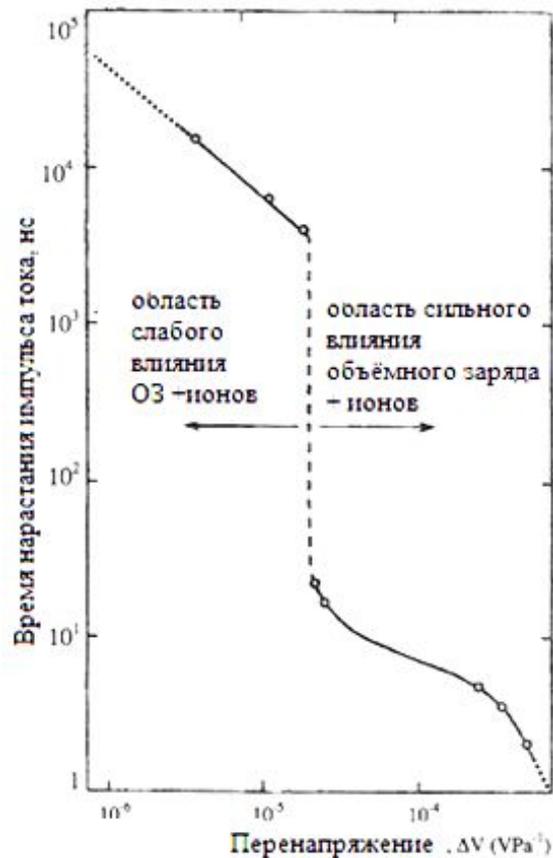
От космического фона запального электрона можно ждать годами [8]! В реальности и запаздывание есть, и перенапряжение есть, но невеликие

Cavity diameter (μm)	Calculated peak ac breakdown strength (kV/mm)	Mean time between free electrons in cavity
5	–	361.69 years
10	–	20 years
20	–	2.5 years
50	12.6	59 days
100	9.5	7.4 days
200	7.2	22 hours
500	5.2	1.4 hours
1000	0.5	10.6 min

Почему не учитывается предистория, в которой электроны возникали, но прилипли к молекулам, а потом к стенкам полости? Тогда развал отрицательных ионов – главный механизм поставки начальных электронов.

А выход простой – измерять U_i при повторном подъёме напряжения. Ещё правильнее измерять U_e

1.9 По какому механизму газового разряда формируются ЧР ?



Даже у очень уважаемых авторов [8] встречаются утверждения, что ЧР имеют не только импульсный, а и квазинепрерывный характер по механизму тлеющего разряда.

Бартникас связывает переход от одной формы к другой с перенапряжениями, которые неизбежно возникают из-за запаздывания возникновения ЧР

Зависимость длительности фронта от перенапряжения при $d = 0,5$ мм (воздух, атмосферное давление)

8. R. Bartnikas. A Comment Concerning the Rise Times of Partial Discharge Pulses // IEEE Trans. on DEIS, 2005. – v.12. – N2. – С. 196 – 202.

1.9 - продолжение



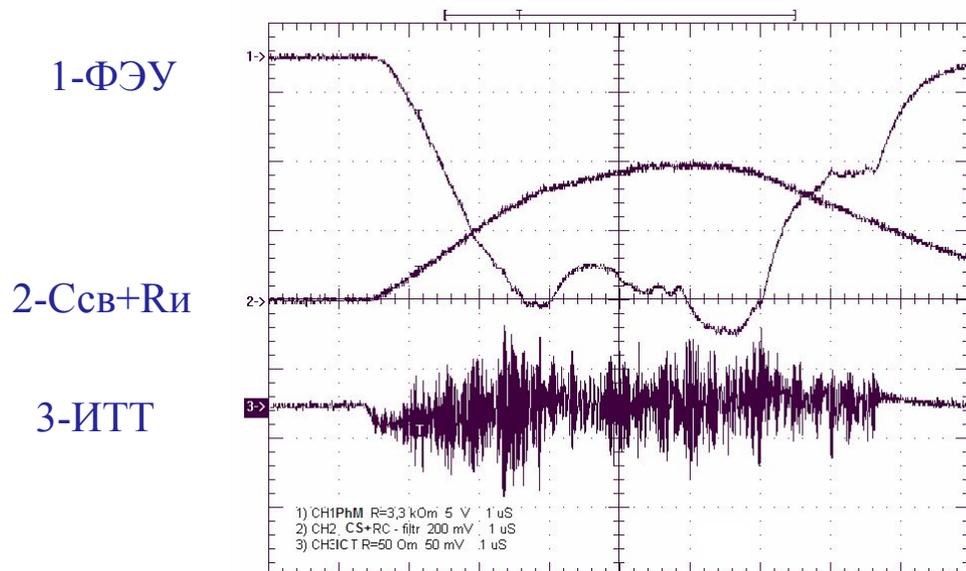
Этого не может быть по простой причине – снижения напряжённости поля после пробега разрядного промежутка первой же электронной лавины и оседания её заряда на противоположной стенке полости.

Скорее всего, у тех, кто это регистрировал, была низкая разрешающая способность во времени и была высокой частота повторения сигналов, отчего возникало наложение сигналов друга на друга, создавая **иллюзию непрерывности** тока ЧР.

Нечто похожее имеет место при ЧР в масле [8, 9].

Очень интересные результаты по длительности фронтов и общей длительности сигналов от ЧР в масле получил Бычков А.Л. (у него будет доклад)

1.9 - продолжение



Даже в тех случаях, когда был сделан распространенный вывод о том, что импульсы тока ЧР достаточно длинные

, измерения в широком диапазоне частот показали, что множество очень коротких импульсов накладывается на ниже лежащие более длинные импульсы. Эти более короткие импульсы будут излучать СВЧ-сигналы, которые могут быть использованы для локализации источника ЧР. [10]

Осциллограммы сигналов короны в масле [9]

9. Колесников А.А., Овсянников А.Г. Исследование пространственно-временных характеристик коронного разряда в воздухе и в масле / Методы и средства оценки состояния энергетического оборудования. Вып. 20.– СПб.: ПЭИПК, 2002. – С. 41 – 45.
10. D. Templeton [и др.]. Обнаружение и локация частичных разрядов в силовых трансформаторах с помощью СВЧ-технологии // Энергоэксперт. – 2013. - № 5. – С. 62 – 67.

2. Недостатки в практике



2.1 Измерение ЧР в объектах с малой ёмкостью

Весьма и весьма неопределённые результаты измерений кажущегося заряда ЧР имеют место при испытаниях объектов с большим соотношением высоты к толщине и малой собственной ёмкостью, например, опорных или подвесных стержневых изоляторов (полимерных, фарфоровых), ОПН и др.

Результат измерения зависит от площади заземлённого электрода (и высоты подставки, наверное): чем больше площадь, тем больше получите кажущийся заряд.

Может, по этой причине **нет норм на ЧР** в этих объектах?

2.2 Градуировка схемы регистрации ЧР в объектах с малой ёмкостью



А как в этом случае обеспечить требование к ёмкости градуировочного конденсатора при калибровке схемы регистрации? Она должна быть много меньше ёмкости объекта. А как это сделать при ёмкости объекта 10...20 пФ!?

Вариант с «перевернутой» схемой градуировки [11] не всегда удобен, и его надо ещё проверять и проверять, из-за неопределённости – в величине паразитной ёмкости.

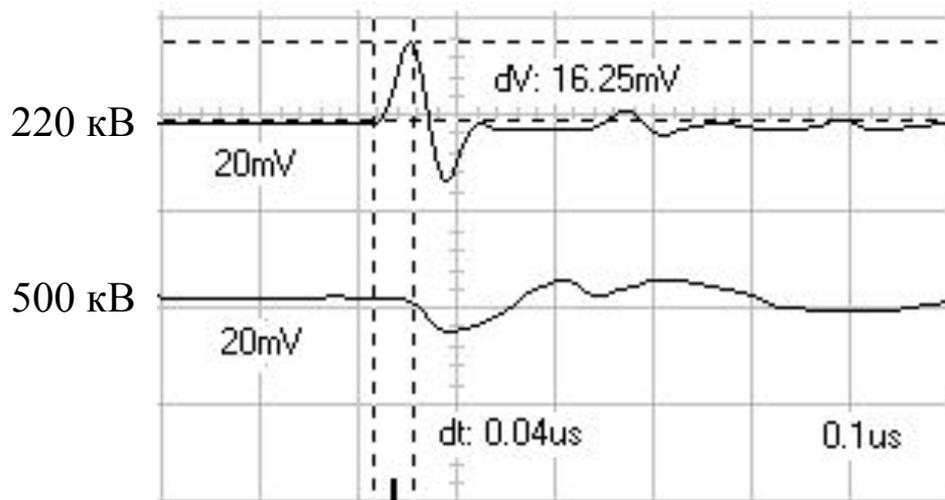
11. Голенко О.В., Живодерников С.В., Овсянников А.Г. «Перевернутая» схема градуировке при регистрации частичных разрядов / Методы и средства оценки состояния энергетического оборудования. Вып. 20.– СПб.: ПЭИПК, 2002. – С. 58 – 65.



2.3 ЧР в витковой изоляции

А на что ориентироваться при оценке заряда ЧР в витковой изоляции или в РПН?

А как градуировать схему регистрации для этих ЧР?



«ЧР» в РПН АТ 500/220
Основной признак – разная полярность на датчиках вводов 220 кВ (верхний луч) и 500 кВ (нижний луч)

2.4 Погрешности регистрации ЧР



Про погрешности оценки заряда с использованием скоростной аппаратуры и градуировки по ГОСТу говорилось и в [12]. Речь шла о влиянии индуктивности вывода от последней обкладки ввода.

Если бы это было так, то в эксплуатации мы никогда не увидели бы столь коротких фронтов сигналов, которые иногда встречаются: до 3...5 наносекунд. Наверное, дело в том, что индуктивности в чистом виде нет, провод идёт, практически окружённый заземлённым металлом, а индуктивность коаксиальной системы близка к нулю.

Но, относительно градуировки всё – «по делу»...

12. Кучинский Г.С., Монастырский А.Е., Пуликов П.Г. Основные проблемы измерения характеристик частичных разрядов в изоляции силовых трансформаторов / Методы и средства оценки состояния энергетического оборудования. Вып. 30. – СПб.: ПЭИПК, 2006. – С. 173 – 180.

2.5 Неизбежные ошибки с градуировкой



В обновлённой редакции МЭК 60270 введены жёсткие требования к погрешности градуировочных генераторов.

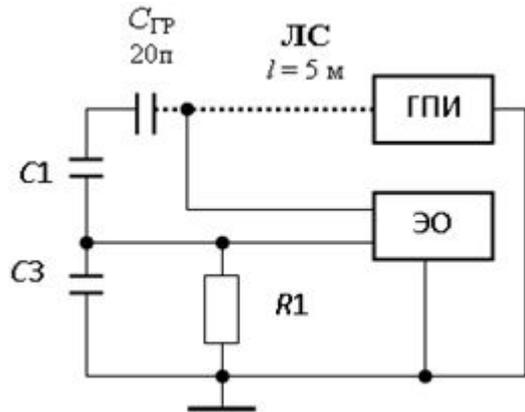
Дошли до «абсурда». Компании, выпускающие регистрирующую аппаратуру, должны использовать эталонный генератор для поверки продаваемых изделий. Сборку рабочих генераторов ведут в стерильно чистых комнатах, потом поверяют их методом сличения выходного напряжения с эталонным генератором и т.д.

А если задуматься, что передают эти генераторы на ввод трансформатора через провод или кабель неопределённой длины, и неопределённых расположения, заземления, согласования и т.д.?

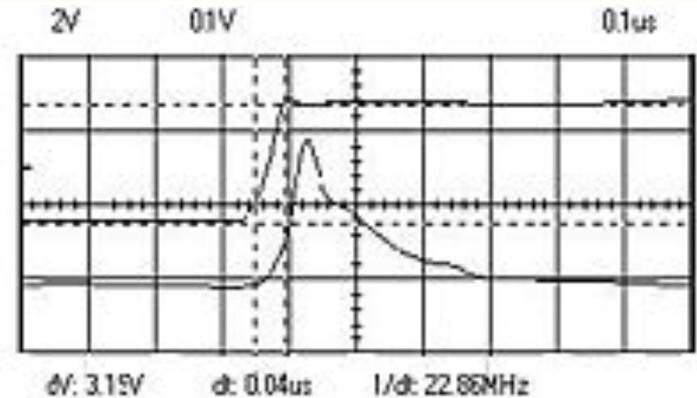
Какой сигнал там, «наверху»?

Какое отношение имеет его амплитуда и форма там же к тем сигналам, которые возникают в схеме регистрации от реальных ЧР?

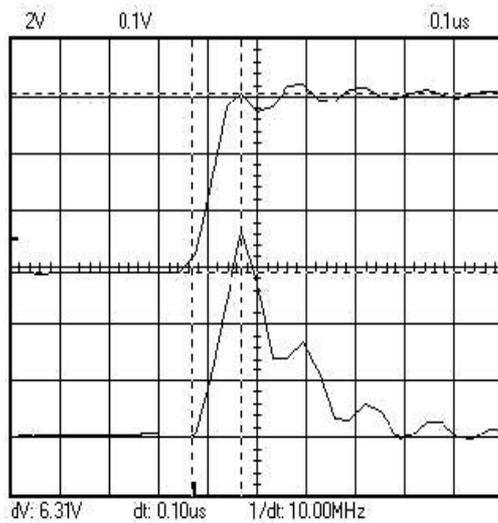
2.5 – продолжение



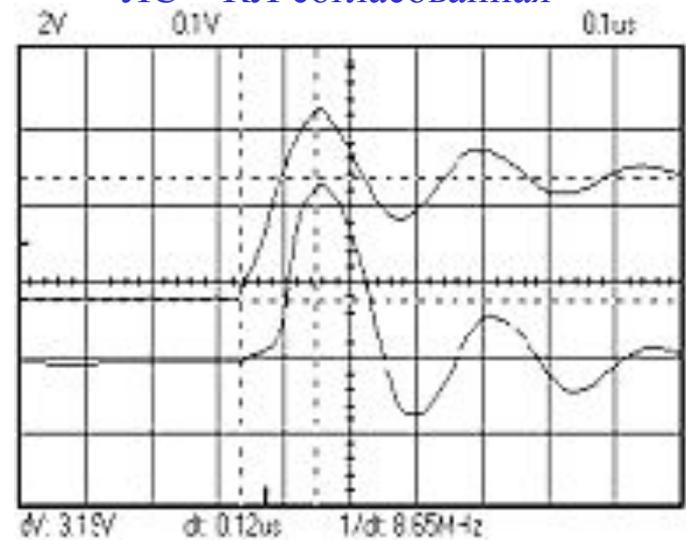
Схема



ЛС – КЛ согласованная



ЛС – провод



ЛС – КЛ несогласованная

2.5 – продолжение



А в КРУЭ, в ГИЛ вообще некуда подать калибровочный сигнал! К шинам не подобраться! Что делать?

Выход первый, а, может, и последний – интегрировать ток ЧР, чтобы получить кажущийся заряд. С цифровой техникой делается легко. Только с пределами интегрирования сложноват выбор.

А, если датчик не резистор, а ВЧ ТТ, то как поступать?

Сначала переводим вольты в амперы (для датчиков «Димрус» $1\text{ В} \approx 0,1\text{ А}$ при нагрузке 50 Ом) и этот ток интегрируем.

Главный источник ошибки – частотная зависимость коэффициента передачи, но в полосе прозрачности этим можно пренебречь (наверное?)

Пример, обработки сигнала ЧР в КРУЭ 220 кВ приведён ниже

2.5 – продолжение

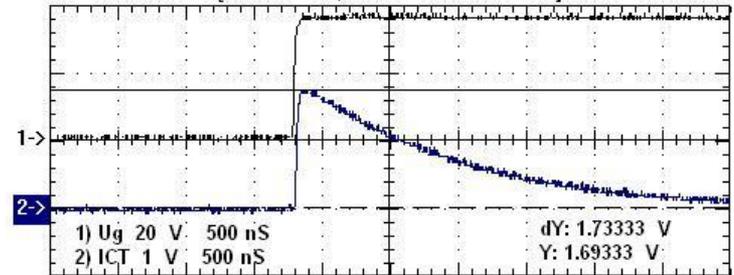
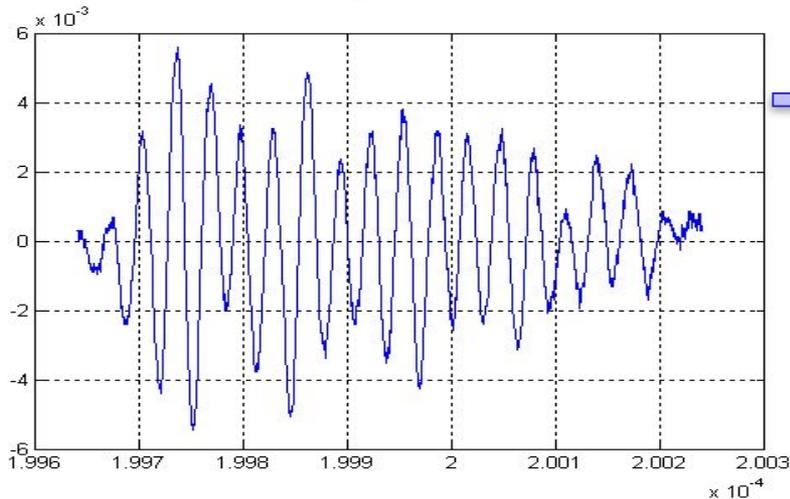
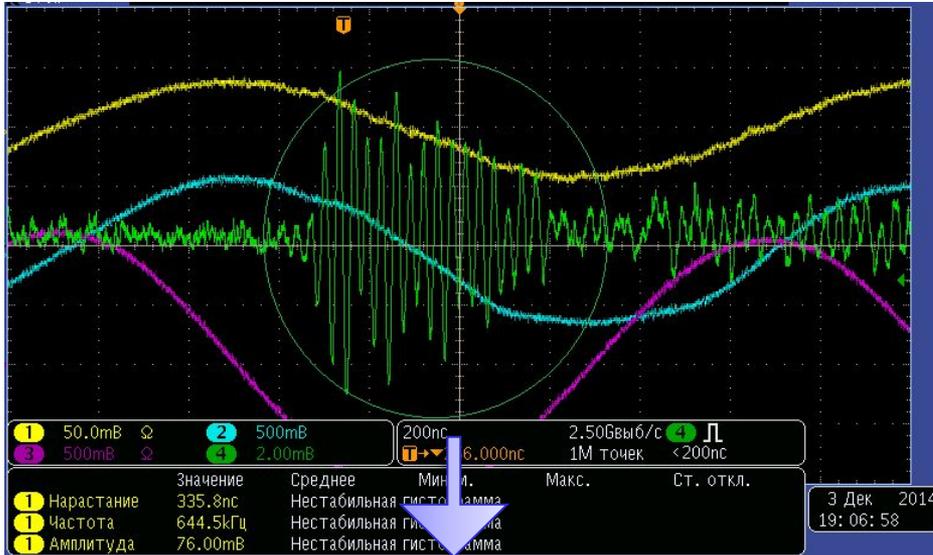


Таблица 1 – Свойства ИТТ при различных нагрузках

Параметр	Сопротивление нагрузки ИТТ, Ом			
	$\infty \parallel 50$	50 \parallel 50	10 \parallel 50	1,8 \parallel 50
K, A/B	0,1	0,19	0,51	2,3
τ , мкс	0,7	1,4	5	17

Кажущийся заряд 5,3 пКл

2.6 Игнорирование затухания



При регистрации ЧР в трансформаторе градуировку проводят, подавая градуировочный заряд в начало обмотки через ввод. Но ЧР могут возникать и в глубине обмотки.

Почему при оценке кажущегося заряда **не учитывается затухание сигналов?**

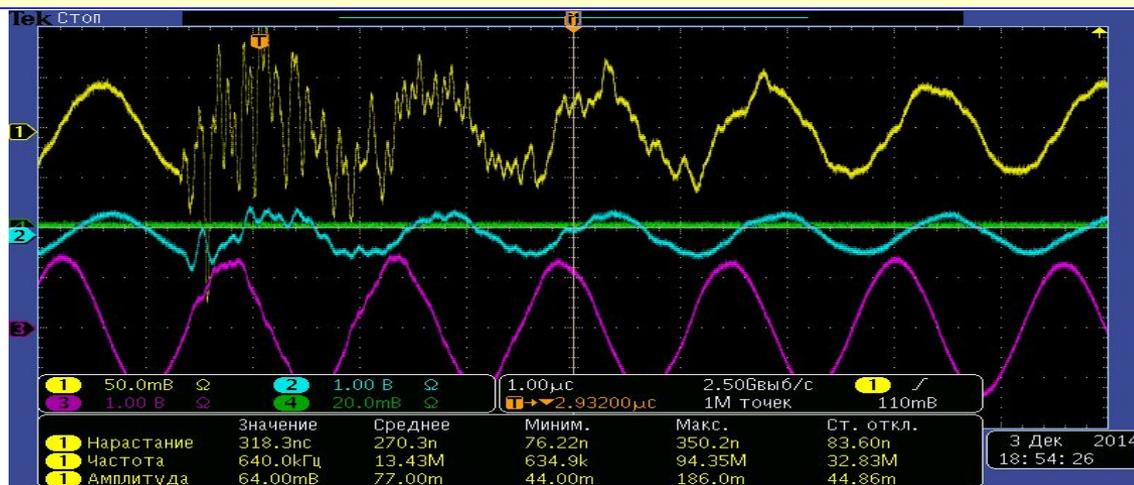
В каком документе сказано, что измеренную величину надо умножить на коэффициент затухания?

Точно так же и с **кабелями!** И с **электрическими машинами!**



2.7 Выбор полосы частот

Все мы клянёмся в верности ГОСТу 20074-83. Стандарт требует верхнюю частоту диапазона в (0,5 – 2) МГц. Это можно сделать только в лабораториях. На ПС уже ВЧ-связь с несущей частотой в сотни килogerц и амплитуду в несколько вольт на шинах РУ делает регистрацию ЧР нереальной. А ещё есть корона и другие помехи.

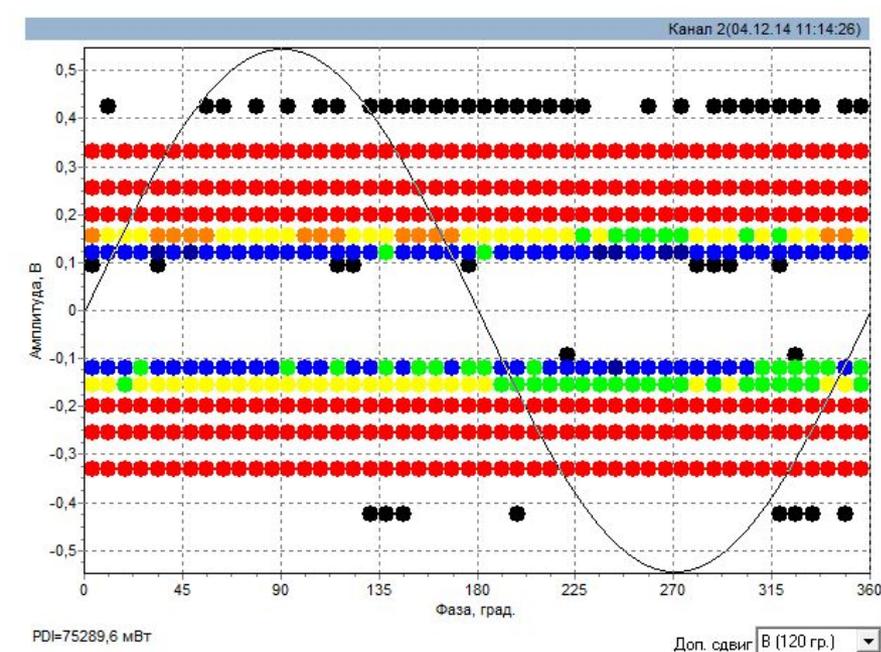
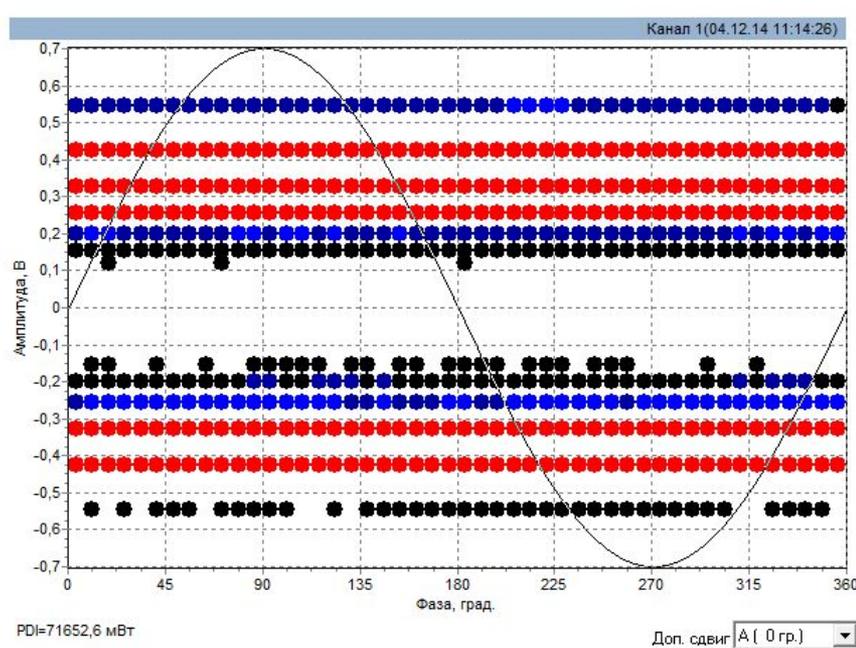


Сигналы в оболочках кабелей на входе в КРУЭ 220 кВ. ВЧ-связь по фазе *C* организована на питающей ВЛ. На оболочке фазы *C* «сидит» около 1 В, на ф. *B* «наведёнка» раз в 5 меньше, на ф. *A* примерно в 20 раз меньше.

2.7 - продолжение



а что намерила система мониторинга там же? – помехи!



По нашему опыту самый мощный инструмент селекции ЧР от помех – короткие (менее 40 нс) фронты, а их можно получить только с верхней частотой в десятки МГц и более.

2.8 Ещё раз про заряд повторяющихся ЧР



МЭК и ГОСТ	– нет конкретных указаний
Русов и др.	– q_{02}
Вдовико	– чаще склоняется к q_{05}
В экспериментах (наших, Бычкова, и др.) с маслом	- повторяемость ЧР – раз в минуты!

Очевидно также что повторяемость зависит о фазовых превращений, например, «жидкость – пар»

А ещё есть затухание. Что делать с ним?



2.9 А где нормы на другие характеристики ЧР?

А) В нормах приводятся только величины кажущегося заряда при разных уровнях напряжения. Но даже в базовом стандарте характеристик – восемь:

3 основных: кажущийся заряд; частота следования; средний ток.

5 дополнительных: напряжение возникновения, напряжение погасания, квадратичный параметр; мощность; суммарный заряд за интервал времени.

В моей практике были случаи, когда важнее всего оказывался не максимальный заряд, а средний ток и напряжения возникновения-погасания ЧР:

- ✓ 1971 г., ЗТЗ, корона от термопары, забытой на обмотке ВН АТ 500 кВ;
- ✓ 2000 – АТ 500 кВ на ПС «Новоанжерская», стружка на обмотках;
- ✓ Керамические конденсаторы, образцы изоляционного бетона и др.

Б) Формат данных о ЧР в ГИС, рекомендованный СИГРЭ, насчитывает 23 «графа», т.е. видов взаимных распределений характеристик ЧР [11].

2.9 - продолжение



1	$N(q)$	распределение амплитуд заряда	Число разрядов с определённой величиной, зависящей от величины заряда	Распределение заряда
2	$N(w)$	Распределение энергии зарядов	Число разрядов с определённой энергией, зависящей от энергии ЧР	Распределение энергии ЧР
3	$N(dt)$	Распределение промежутков времени	число определённых промежутков времени между двумя последовательными разрядами, в зависимости от этого текущего времени	Статистика межимпульсного интервала
...
23				

И т.д.

13. Lapp A., Kranz H.G. The use of the CIGRE data format for PD diagnosis application // IEEE Trans. On DEIS. – 2000. – pp.102-112

2.9 - продолжение



В) Э. Гульским по АФД 20 лет назад созданы 27 образов («finger prints») дефектов изоляции вводов, трансформаторов и др.[12].

Г) «Димрус» обнародовал 4 амплитудно-фазовые диаграммы короны на шинах и частичных разрядов от дефектов типа «объект с плавающим потенциалом», внутренних включений в средней и ближе к земле частям изоляции. Правда, получены они на моделях, а не в реальном объекте.

Д) «Димрус» зашил измерения ЧР в Т-Ф плоскости. И как?

Е) У А.Е. Монастырского тоже есть набор модельных дефектов в масле. Кто знает о них кроме автора?

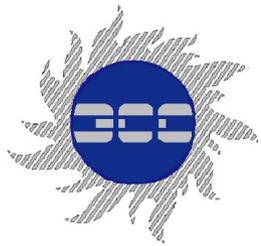
Давайте скинемся, у кого что наработано в этой части!

14. Gulsky E. Application of modern PD detection techniques to fault recognition in the insulation of high voltage equipment / Proc. 9th ISH, Graz. – 1995. – Paper 4532.

«Сухой остаток»



1. Даже со всеми недомолвками и недостатками диагностирование по ЧР является прекрасным инструментом технологического контроля в заводских лабораториях и уже потому **имеет право на жизнь!**
2. Для околонуточных целей надо бы:
 - достигнуть лучшего понимания, что мы измеряем от ЧР разных видов;
 - использовать большее число характеристик, чтобы наработать достоверные образы ЧР.
- 3 Для внедрения метода ЧР в практику- поработать над устранением перечисленных недостатков...



Спасибо за внимание!