



КАЗАНЬ, 1 – 3 ОКТЯБРЯ

МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА И АВТОМАТИКА ЭНЕРГОСИСТЕМ – 2025

инженерный центр
Энергосервис

Совершенствование методов испытаний измерительного канала системы РЗА

Плакидин Роман Сергеевич

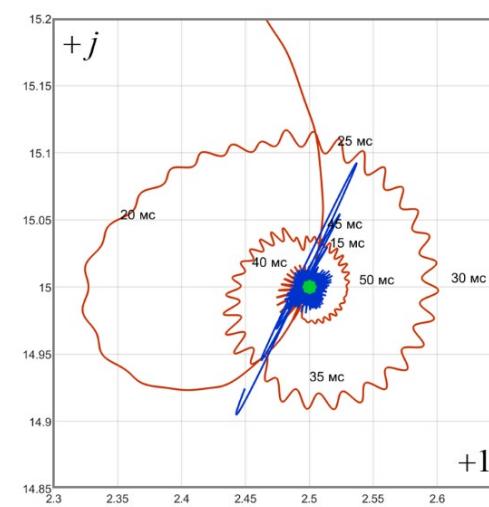
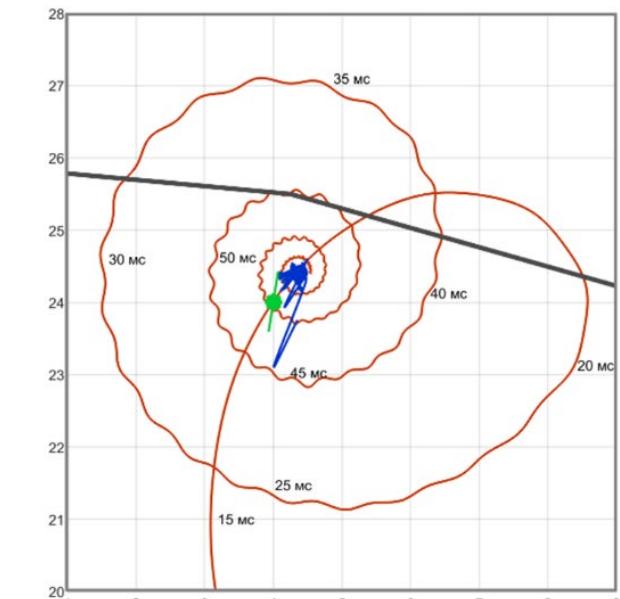
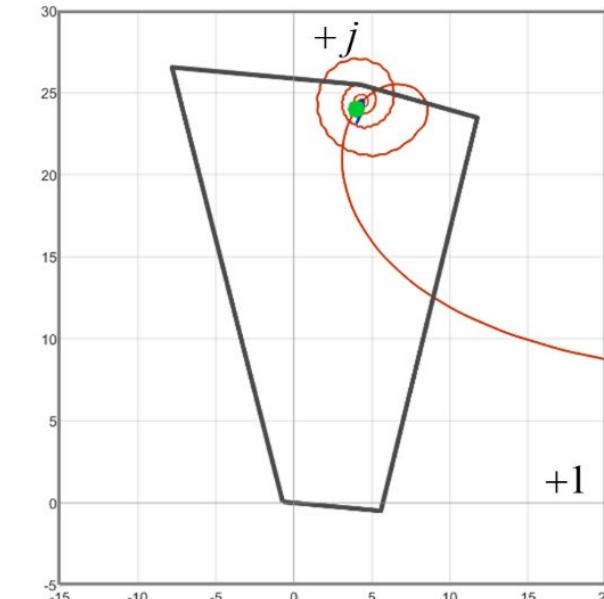
Инженер по метрологии

ООО «Инженерный центр «Энергосервис»

Россия

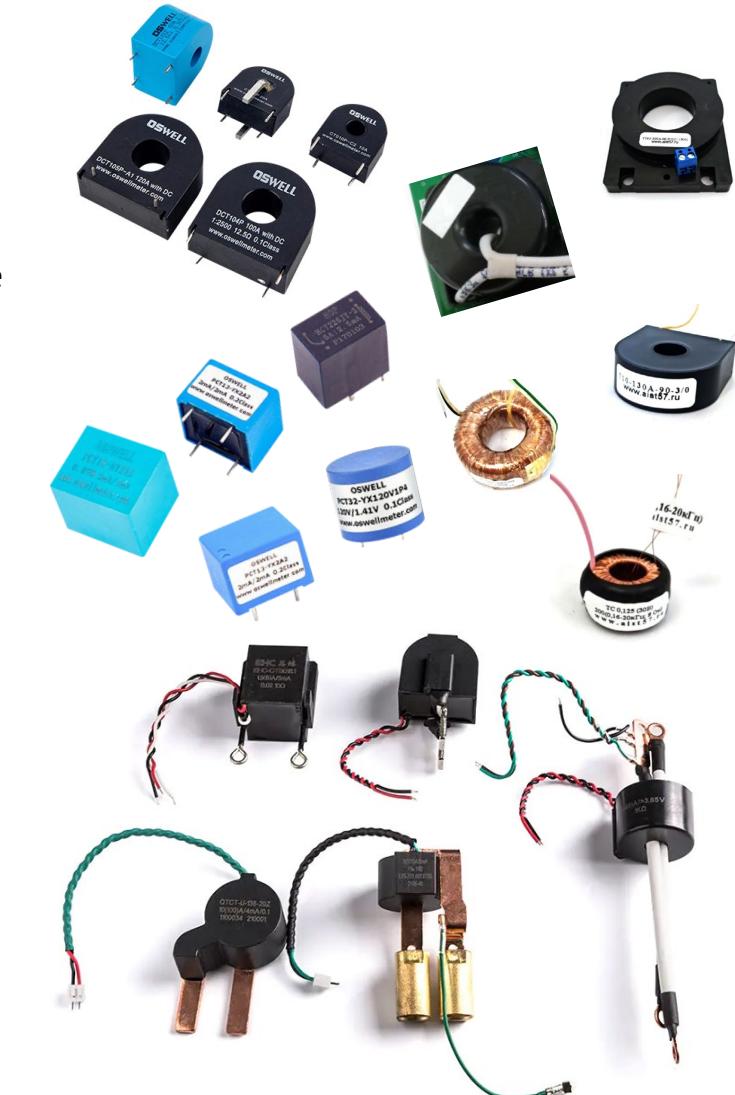
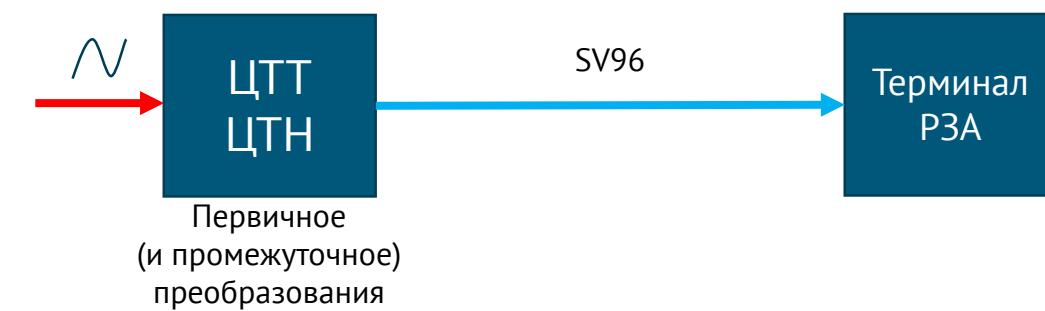
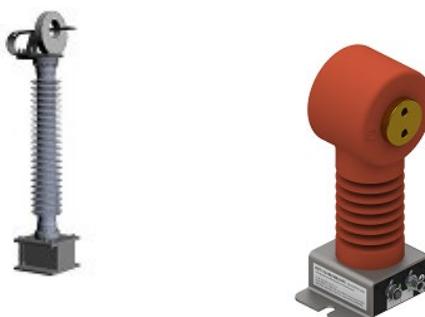
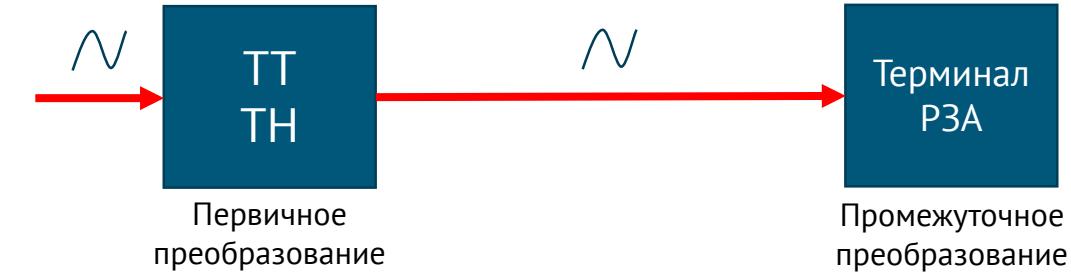


Новые алгоритмы защищ



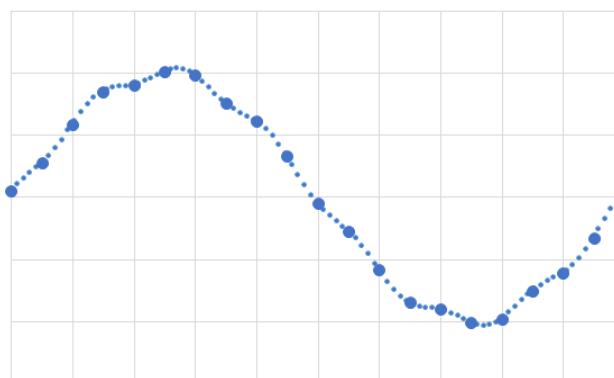
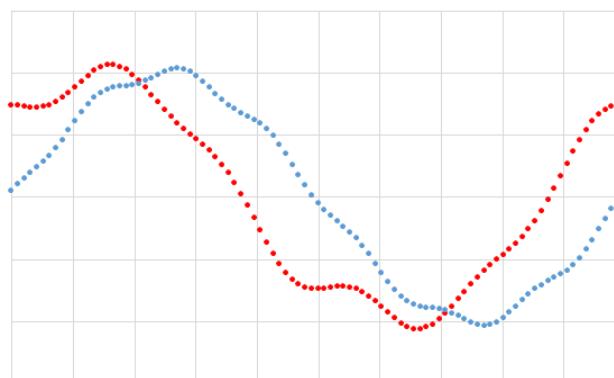
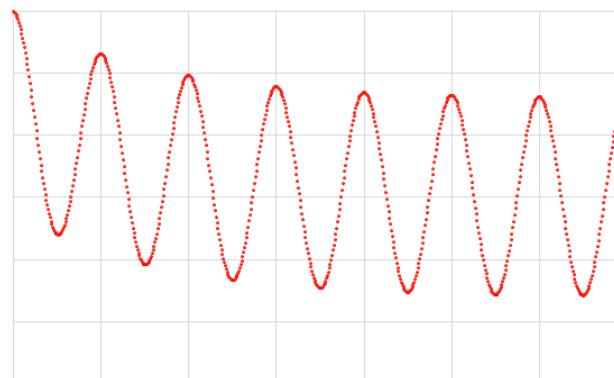
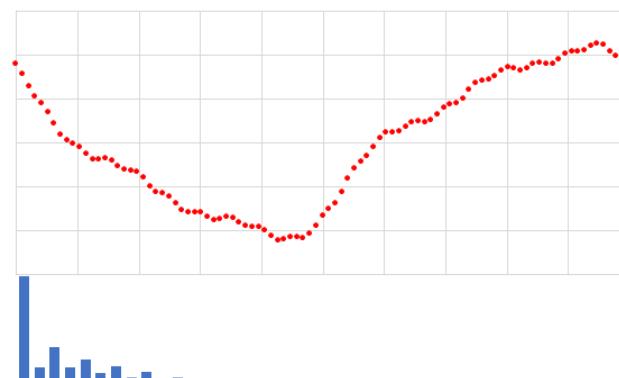
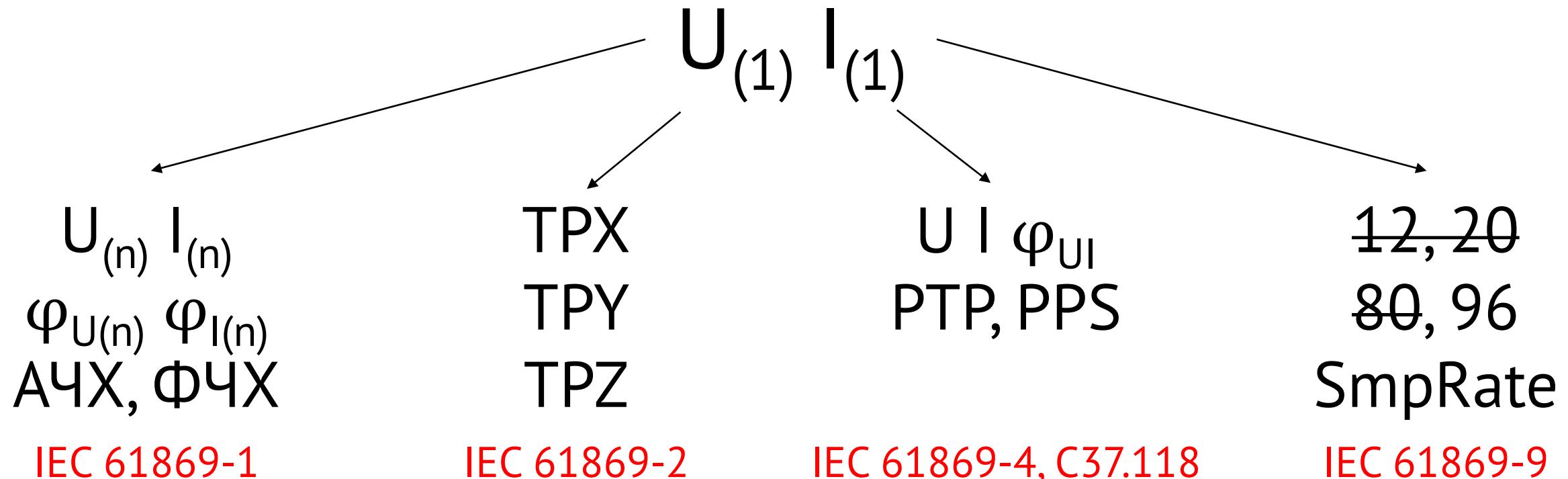


Измерительный канал РЗА



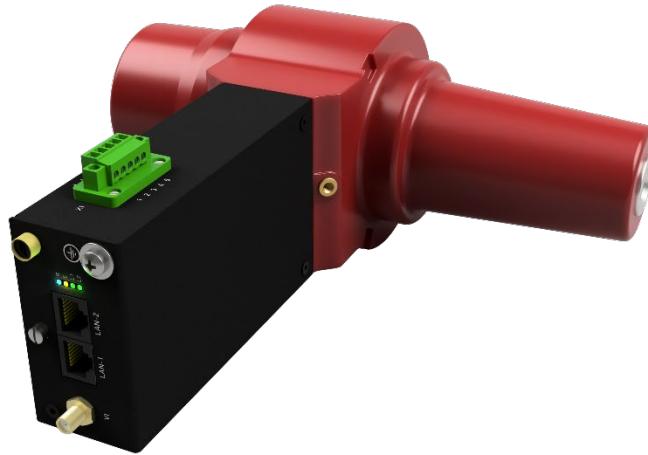


Измеряемые параметры





Классификация по IEC 61869



Комбинированный
измерительный трансформатор
тока
и напряжения
с цифровым интерфейсом



IEC 61869-4
IEC 61869-1
IEC 61869-2, IEC 61869-8
IEC 61869-3, IEC 61869-5, IEC 61869-7
IEC 61869-9



ЕСИТ-2-15-100(1600)-24-FX2-R1
Трансформатор измерительный
изменяющий ток и напряжение
100/1600 А, 50 Гц, 90
Линия(2000), земля(3000), заземление(950)
Инвертор(100 А, исп.1600 А, исп.1000 А)
Инвертор(100 А, исп.1600 А, исп.1000 А)
Инвертор(100 А, исп.1600 А, исп.1000 А)
IEC 61869-1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9
IEC 61869-10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19
IEC 61869-21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30
IEC 61869-31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40
IEC 61869-41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50
IEC 61869-51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60
IEC 61869-61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70
IEC 61869-71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80
IEC 61869-81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90
IEC 61869-91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100
IEC 61869-101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110
IEC 61869-111, 112, 113, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 120
IEC 61869-121, 122, 123, 124, 125, 126, 127, 128, 129, 130
IEC 61869-131, 132, 133, 134, 135, 136, 137, 138, 139, 140
IEC 61869-141, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 150
IEC 61869-151, 152, 153, 154, 155, 156, 157, 158, 159, 160
IEC 61869-161, 162, 163, 164, 165, 166, 167, 168, 169, 170
IEC 61869-171, 172, 173, 174, 175, 176, 177, 178, 179, 180
IEC 61869-181, 182, 183, 184, 185, 186, 187, 188, 189, 190
IEC 61869-191, 192, 193, 194, 195, 196, 197, 198, 199, 200
IEC 61869-201, 202, 203, 204, 205, 206, 207, 208, 209, 210
IEC 61869-211, 212, 213, 214, 215, 216, 217, 218, 219, 220
IEC 61869-221, 222, 223, 224, 225, 226, 227, 228, 229, 230
IEC 61869-231, 232, 233, 234, 235, 236, 237, 238, 239, 240
IEC 61869-241, 242, 243, 244, 245, 246, 247, 248, 249, 250
IEC 61869-251, 252, 253, 254, 255, 256, 257, 258, 259, 260
IEC 61869-261, 262, 263, 264, 265, 266, 267, 268, 269, 270
IEC 61869-271, 272, 273, 274, 275, 276, 277, 278, 279, 280
IEC 61869-281, 282, 283, 284, 285, 286, 287, 288, 289, 290
IEC 61869-291, 292, 293, 294, 295, 296, 297, 298, 299, 300
IEC 61869-301, 302, 303, 304, 305, 306, 307, 308, 309, 310
IEC 61869-311, 312, 313, 314, 315, 316, 317, 318, 319, 320
IEC 61869-321, 322, 323, 324, 325, 326, 327, 328, 329, 330
IEC 61869-331, 332, 333, 334, 335, 336, 337, 338, 339, 340
IEC 61869-341, 342, 343, 344, 345, 346, 347, 348, 349, 350
IEC 61869-351, 352, 353, 354, 355, 356, 357, 358, 359, 360
IEC 61869-361, 362, 363, 364, 365, 366, 367, 368, 369, 370
IEC 61869-371, 372, 373, 374, 375, 376, 377, 378, 379, 380
IEC 61869-381, 382, 383, 384, 385, 386, 387, 388, 389, 390
IEC 61869-391, 392, 393, 394, 395, 396, 397, 398, 399, 400
IEC 61869-401, 402, 403, 404, 405, 406, 407, 408, 409, 410
IEC 61869-411, 412, 413, 414, 415, 416, 417, 418, 419, 420
IEC 61869-421, 422, 423, 424, 425, 426, 427, 428, 429, 430
IEC 61869-431, 432, 433, 434, 435, 436, 437, 438, 439, 440
IEC 61869-441, 442, 443, 444, 445, 446, 447, 448, 449, 450
IEC 61869-451, 452, 453, 454, 455, 456, 457, 458, 459, 460
IEC 61869-461, 462, 463, 464, 465, 466, 467, 468, 469, 470
IEC 61869-471, 472, 473, 474, 475, 476, 477, 478, 479, 480
IEC 61869-481, 482, 483, 484, 485, 486, 487, 488, 489, 490
IEC 61869-491, 492, 493, 494, 495, 496, 497, 498, 499, 500
IEC 61869-501, 502, 503, 504, 505, 506, 507, 508, 509, 510
IEC 61869-511, 512, 513, 514, 515, 516, 517, 518, 519, 520
IEC 61869-521, 522, 523, 524, 525, 526, 527, 528, 529, 530
IEC 61869-531, 532, 533, 534, 535, 536, 537, 538, 539, 540
IEC 61869-541, 542, 543, 544, 545, 546, 547, 548, 549, 550
IEC 61869-551, 552, 553, 554, 555, 556, 557, 558, 559, 560
IEC 61869-561, 562, 563, 564, 565, 566, 567, 568, 569, 570
IEC 61869-571, 572, 573, 574, 575, 576, 577, 578, 579, 580
IEC 61869-581, 582, 583, 584, 585, 586, 587, 588, 589, 590
IEC 61869-591, 592, 593, 594, 595, 596, 597, 598, 599, 600
IEC 61869-601, 602, 603, 604, 605, 606, 607, 608, 609, 610
IEC 61869-611, 612, 613, 614, 615, 616, 617, 618, 619, 620
IEC 61869-621, 622, 623, 624, 625, 626, 627, 628, 629, 630
IEC 61869-631, 632, 633, 634, 635, 636, 637, 638, 639, 640
IEC 61869-641, 642, 643, 644, 645, 646, 647, 648, 649, 650
IEC 61869-651, 652, 653, 654, 655, 656, 657, 658, 659, 660
IEC 61869-661, 662, 663, 664, 665, 666, 667, 668, 669, 670
IEC 61869-671, 672, 673, 674, 675, 676, 677, 678, 679, 680
IEC 61869-681, 682, 683, 684, 685, 686, 687, 688, 689, 690
IEC 61869-691, 692, 693, 694, 695, 696, 697, 698, 699, 700
IEC 61869-701, 702, 703, 704, 705, 706, 707, 708, 709, 710
IEC 61869-711, 712, 713, 714, 715, 716, 717, 718, 719, 720
IEC 61869-721, 722, 723, 724, 725, 726, 727, 728, 729, 730
IEC 61869-731, 732, 733, 734, 735, 736, 737, 738, 739, 740
IEC 61869-741, 742, 743, 744, 745, 746, 747, 748, 749, 750
IEC 61869-751, 752, 753, 754, 755, 756, 757, 758, 759, 760
IEC 61869-761, 762, 763, 764, 765, 766, 767, 768, 769, 770
IEC 61869-771, 772, 773, 774, 775, 776, 777, 778, 779, 780
IEC 61869-781, 782, 783, 784, 785, 786, 787, 788, 789, 790
IEC 61869-791, 792, 793, 794, 795, 796, 797, 798, 799, 800
IEC 61869-801, 802, 803, 804, 805, 806, 807, 808, 809, 810
IEC 61869-811, 812, 813, 814, 815, 816, 817, 818, 819, 820
IEC 61869-821, 822, 823, 824, 825, 826, 827, 828, 829, 830
IEC 61869-831, 832, 833, 834, 835, 836, 837, 838, 839, 840
IEC 61869-841, 842, 843, 844, 845, 846, 847, 848, 849, 850
IEC 61869-851, 852, 853, 854, 855, 856, 857, 858, 859, 860
IEC 61869-861, 862, 863, 864, 865, 866, 867, 868, 869, 870
IEC 61869-871, 872, 873, 874, 875, 876, 877, 878, 879, 880
IEC 61869-881, 882, 883, 884, 885, 886, 887, 888, 889, 890
IEC 61869-891, 892, 893, 894, 895, 896, 897, 898, 899, 900
IEC 61869-901, 902, 903, 904, 905, 906, 907, 908, 909, 910
IEC 61869-911, 912, 913, 914, 915, 916, 917, 918, 919, 920
IEC 61869-921, 922, 923, 924, 925, 926, 927, 928, 929, 930
IEC 61869-931, 932, 933, 934, 935, 936, 937, 938, 939, 940
IEC 61869-941, 942, 943, 944, 945, 946, 947, 948, 949, 950
IEC 61869-951, 952, 953, 954, 955, 956, 957, 958, 959, 960
IEC 61869-961, 962, 963, 964, 965, 966, 967, 968, 969, 970
IEC 61869-971, 972, 973, 974, 975, 976, 977, 978, 979, 980
IEC 61869-981, 982, 983, 984, 985, 986, 987, 988, 989, 990
IEC 61869-991, 992, 993, 994, 995, 996, 997, 998, 999, 1000

ЕР
Российский центр
Энергосервис
ens
Сделано в России



Комбинированные трансформаторы

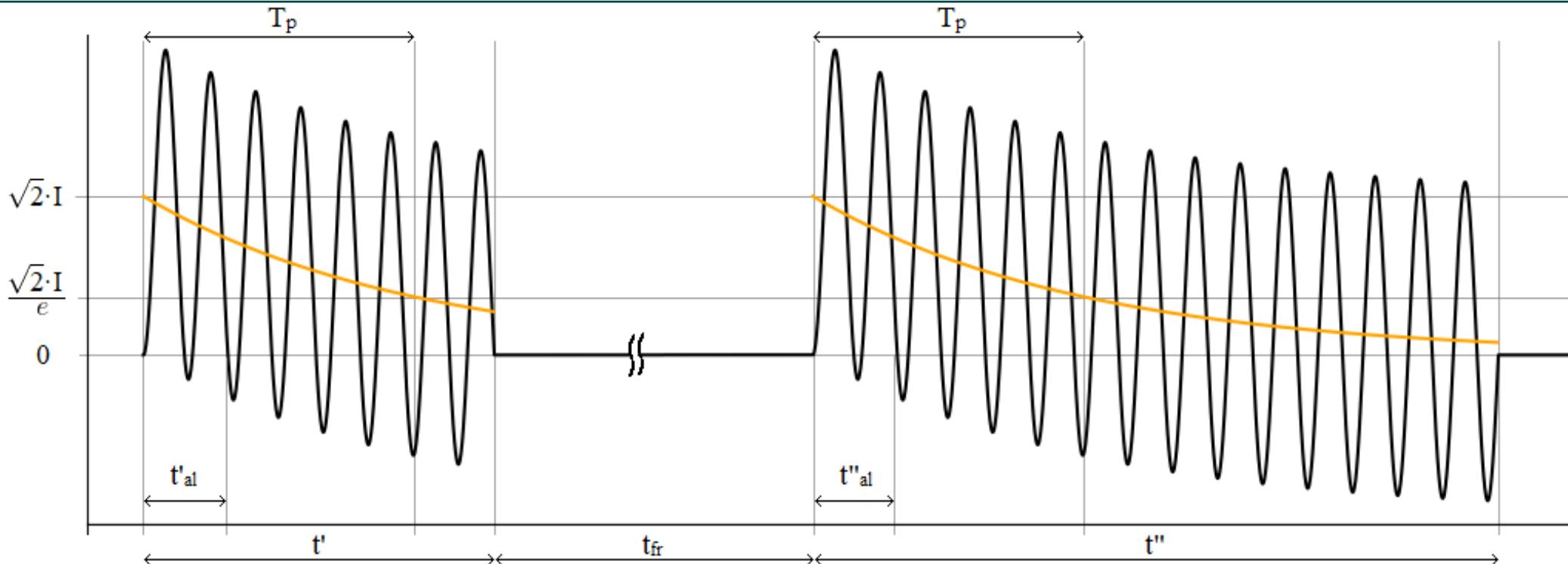


Номер в госреестре	Наименование СИ	Обозначение типа СИ	Изготовитель
73766-19	Трансформаторы комбинированные	НТОЛП-НТЗ, ЗНТОЛП-НТЗ	Общество с ограниченной ответственностью "Невский Трансформаторный Завод "Волхов" (ООО "НТЗ "Волхов"), г. Великий Новгород
62261-15			
55601-13			
54310-13	Трансформаторы комбинированные	EJGF	Фирма "PFIFFNER Deutschland GmbH", Германия
52351-12	Трансформаторы комбинированные	KA-123, KA-245	Фирма "Electrotecnica Arteche Hermanos S.L.", Испания
50642-12	Трансформаторы комбинированные	KGBE12 (4MK12), KGBE24 (4MK24), KGBE40,5 (4MK40,5)	Фирма "RITZ Instrument Transformers GmbH", Германия
49012-12	Трансформаторы комбинированные	KOTEF 245	Фирма "AREVA T&D Messwandler GmbH", Германия
39473-13	Трансформаторы комбинированные	SVAS 123/245/362/550	Фирма "Trench Germany GmbH", Германия
39473-08			
38887-14	Трансформаторы комбинированные	AVG 123/245	Фирма "Trench Italia S.r.l.", Италия
38887-08			
53609-13	Трансформаторы комбинированные	VAU-123/245/362	Фирма "KONCAR - Instrument transformers Inc.", Хорватия
37850-08			
35647-07	Трансформаторы комбинированные	KGBE12-40,5 (4MK12-40,5)	Фирма "RITZ Instrument Transformers GmbH", Германия
30828-05	Трансформаторы комбинированные	JUK 123a	Фирма "ABB Sp. z.o.o.", Польша
82812-21	Трансформаторы тока и напряжения измерительные комбинированные электронные	TECV	Общество с ограниченной ответственностью "Оптиметрик" (ООО "Оптиметрик"), г. Ярославль
75752-19	Трансформаторы тока и напряжения комбинированные	ТГК	Общество с ограниченной ответственностью "ЗЭТО-Газовые Технологии" (ООО "ЗЭТО-Газовые Технологии"), Псковская обл., г. Великие Луки
72862-18	Трансформаторы тока и напряжения комбинированные электронные	ТТНК	АО "Профотек", г. Москва; ООО "НПЦ Профотек", г. Москва
70302-18	Трансформаторы тока и напряжения комбинированные цифровые	ЦТН	ООО НПО "Цифровые измерительные трансформаторы", г.Иваново





Требования к работе в переходных режимах



Нормированный рабочий цикл В-О-В-О (С-О-С-О duty cycle)

t и t' – продолжительность первого и второго включения;

t_{fr} (fault repetition time) – временной интервал между прерыванием и повторным возникновением тока короткого замыкания в первичной обмотке (время отдыха между срабатываниями);

t_{al} и t''_{al} (time to accuracy limit) – минимальное время, в течение которого точность измерений остается в пределах заявленного точности (время до насыщения) во время первого и второго включения;

T_p – постоянная времени (время, за которое апериодическая составляющая уменьшается в e раз).



Требования к частотной характеристике

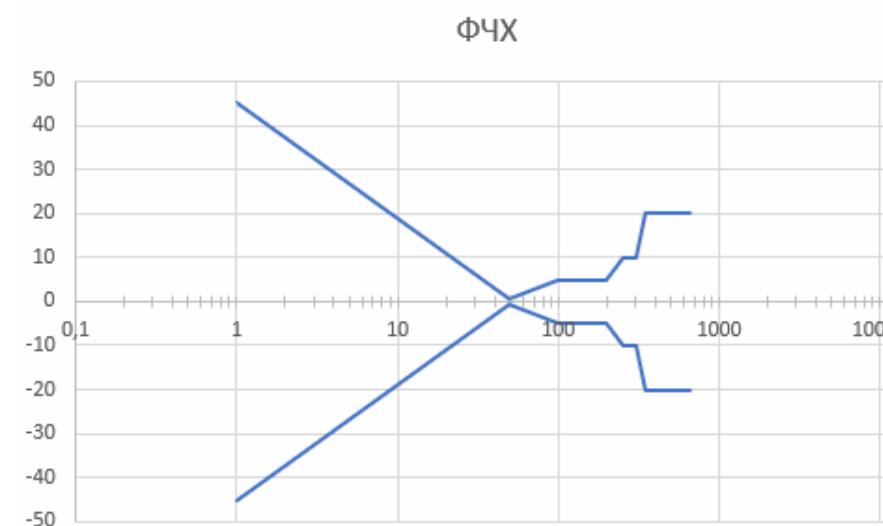
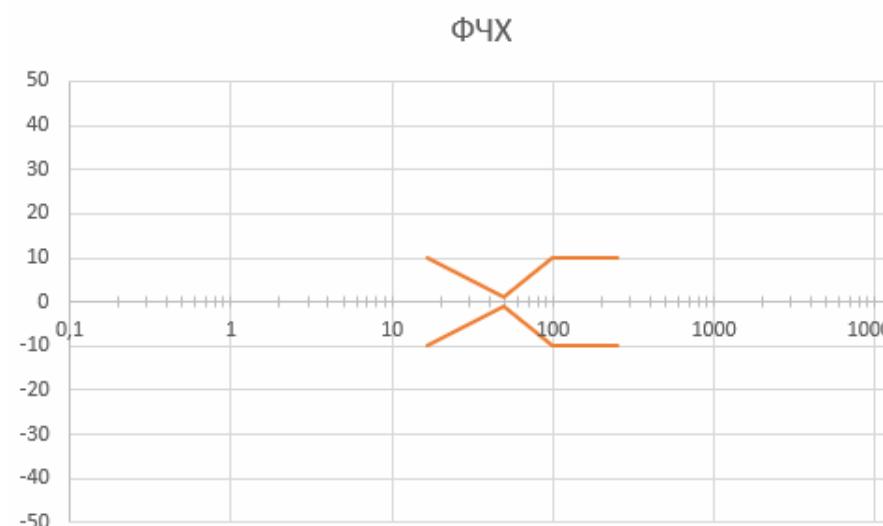
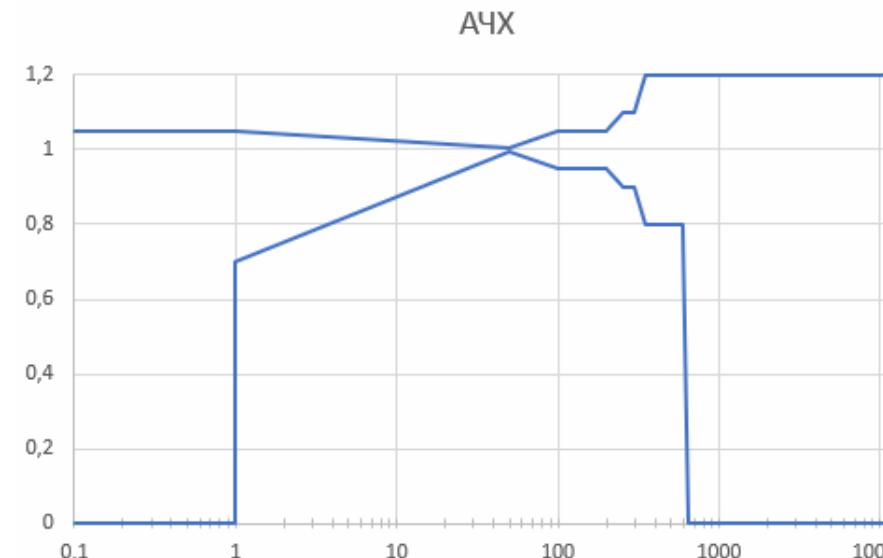
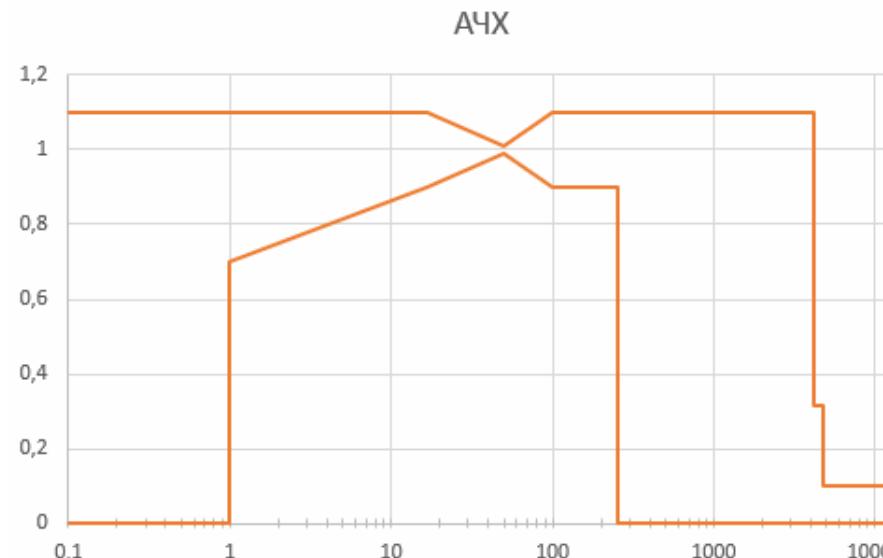


Класс точности 5

Дискретизация 4800 Гц

Класс точности 0,5S-WB0

Дискретизация 14400 Гц

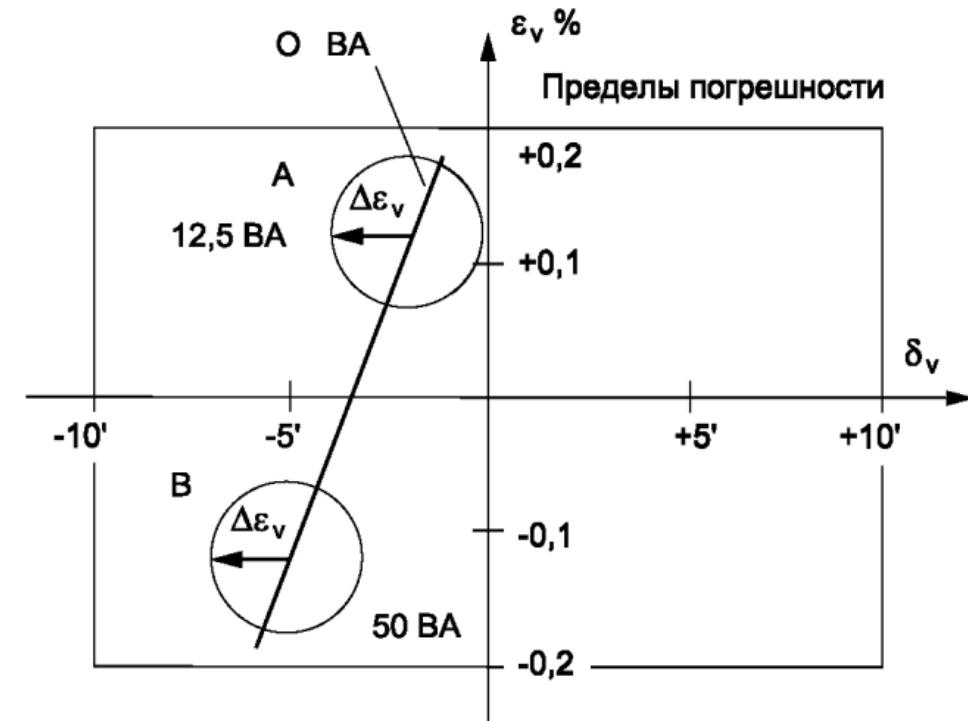
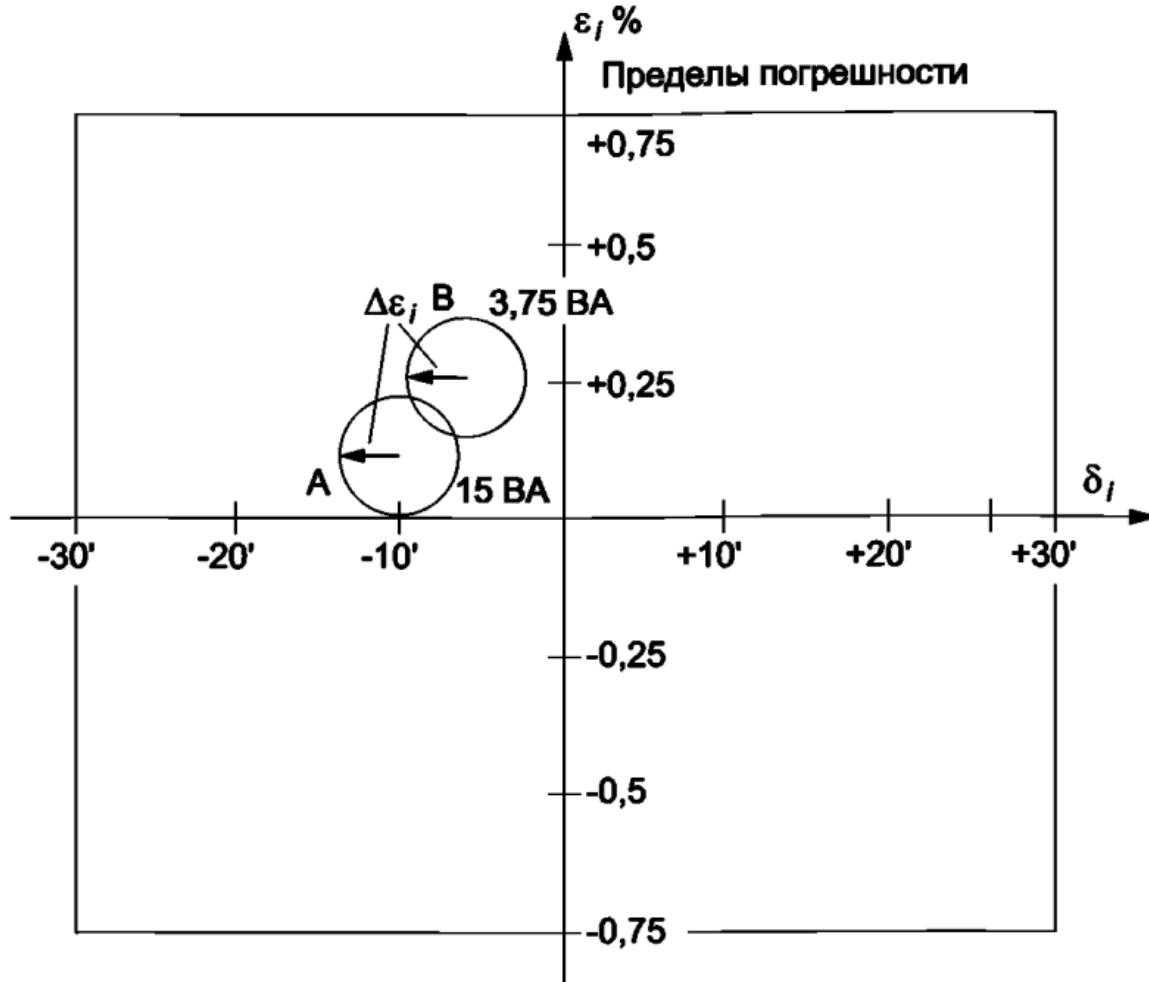




Требования к комбинированным трансформаторам

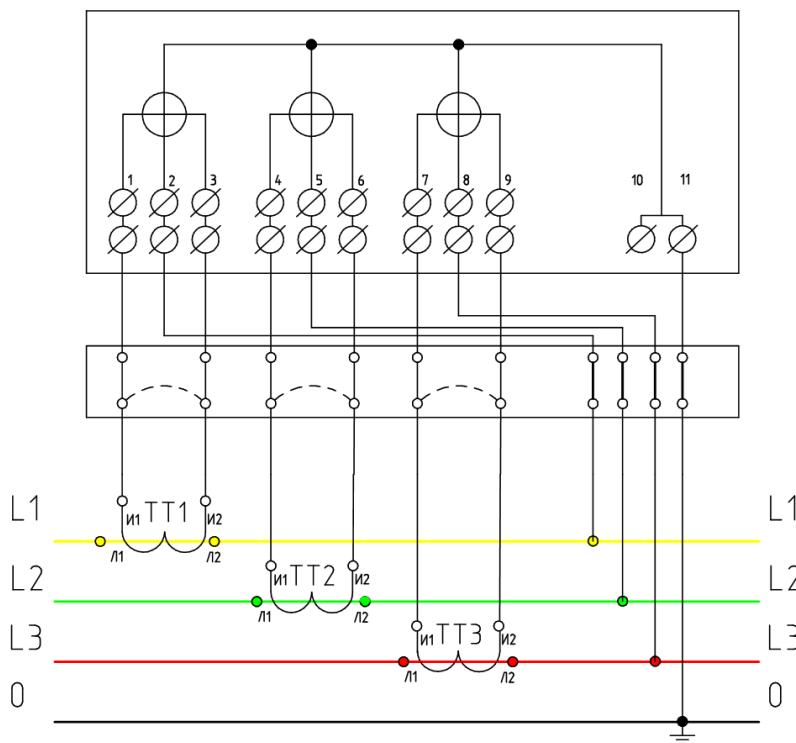


IEC 61869-4
ГОСТ Р МЭК 61869-4—2019





Генератор фиктивной мощности для вторичных цепей





Генератор фиктивной мощности для первичных цепей



Электродинамическая модель МЭИ





Новый стенд ИЦ ВЭИ
позволяет испытывать
на длительный нагрев
токами до 50 000 А
различные устройства
с напряжением до 750 кВ



Схема подключения (напряжение)

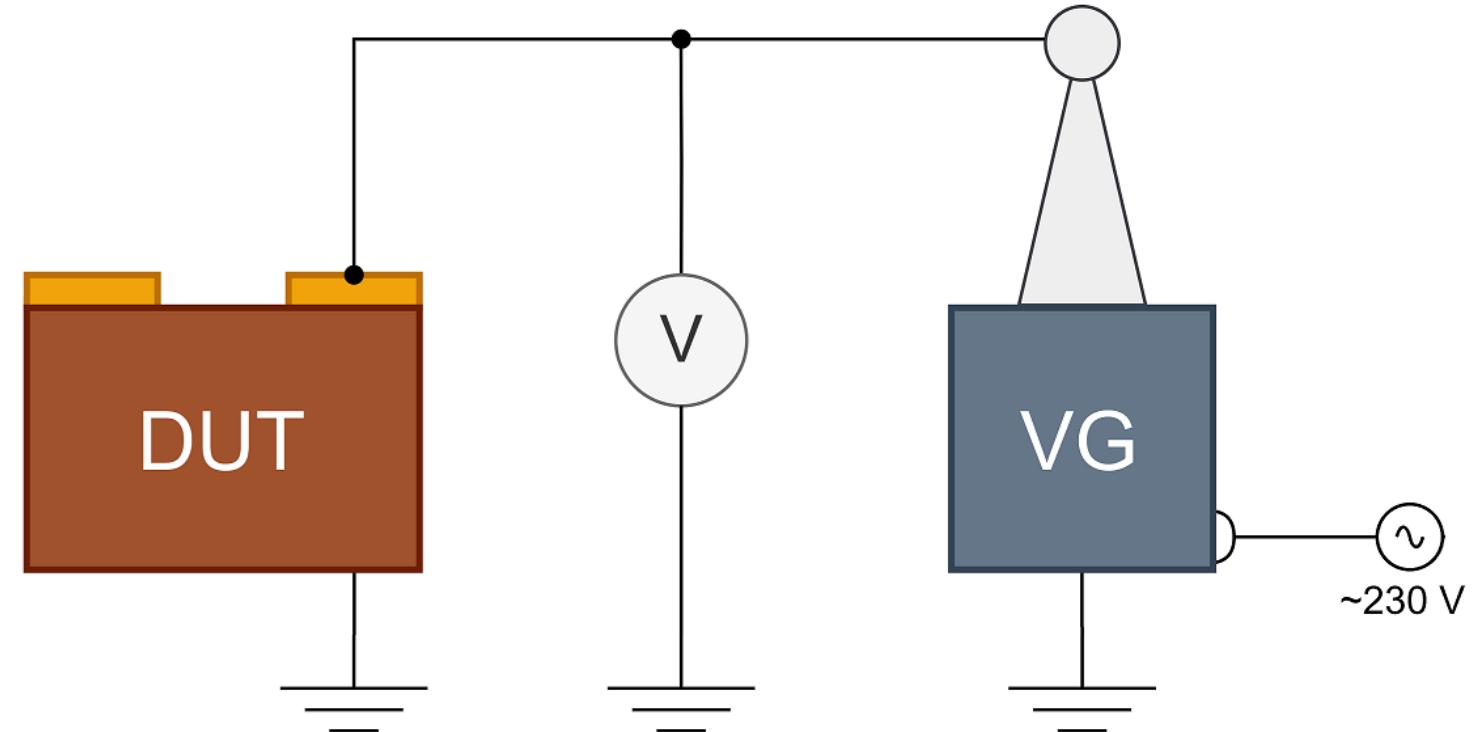




Схема подключения (сила тока)

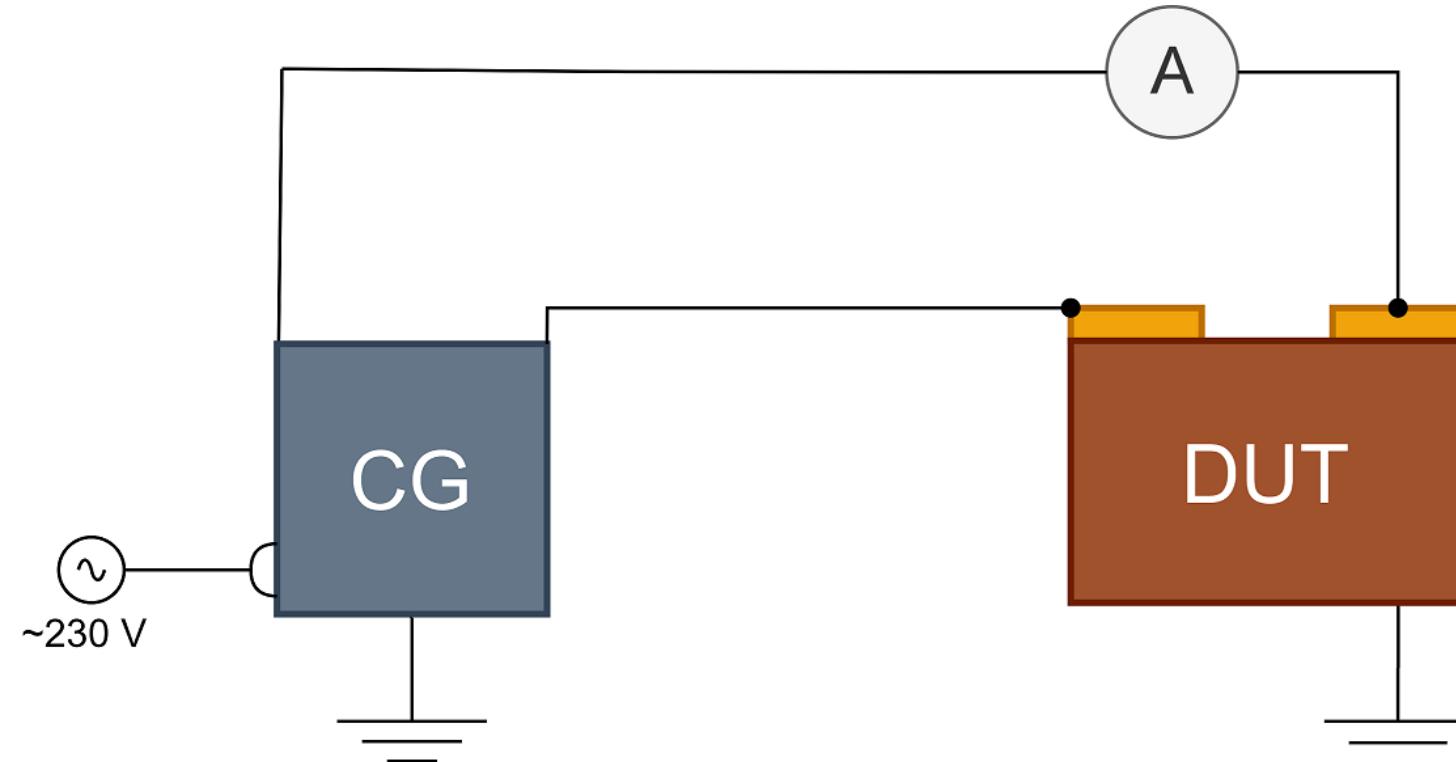


Схема подключения (ток + напряжение)

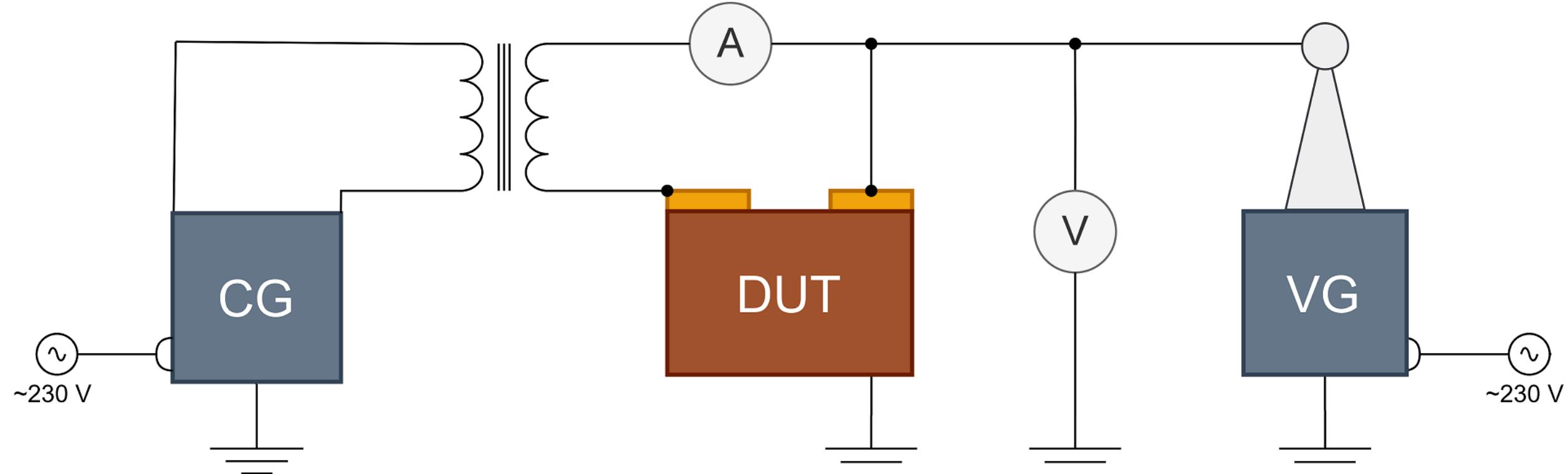




Схема подключения (ток + напряжение)

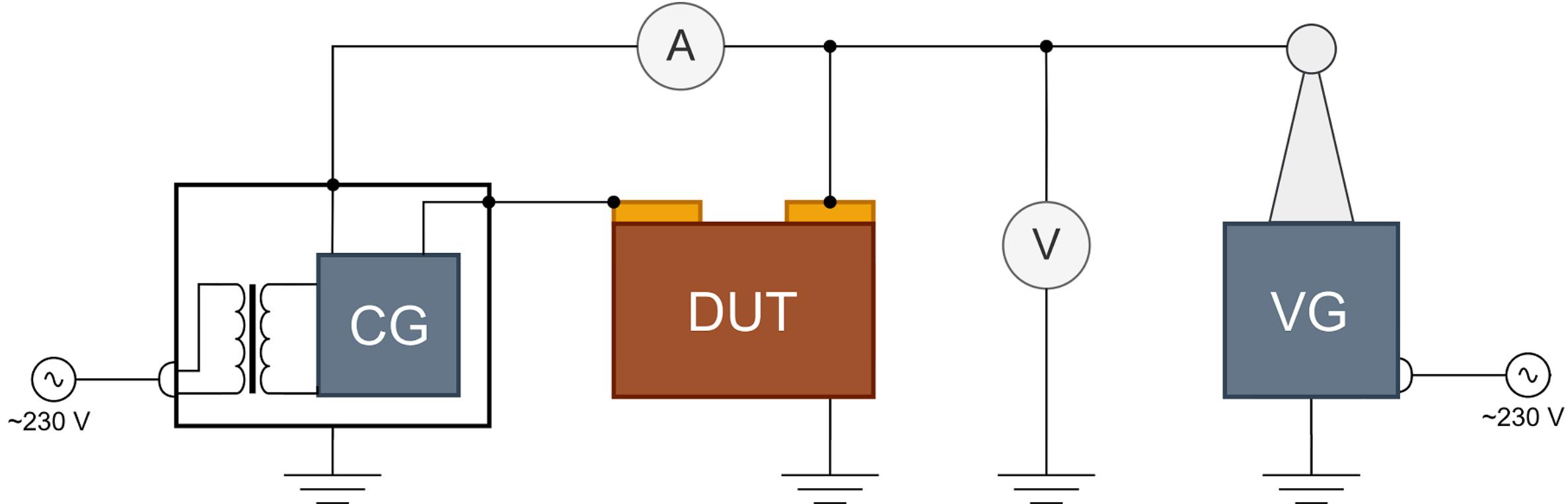




Схема подключения ECIT-1 (ток + напряжение)

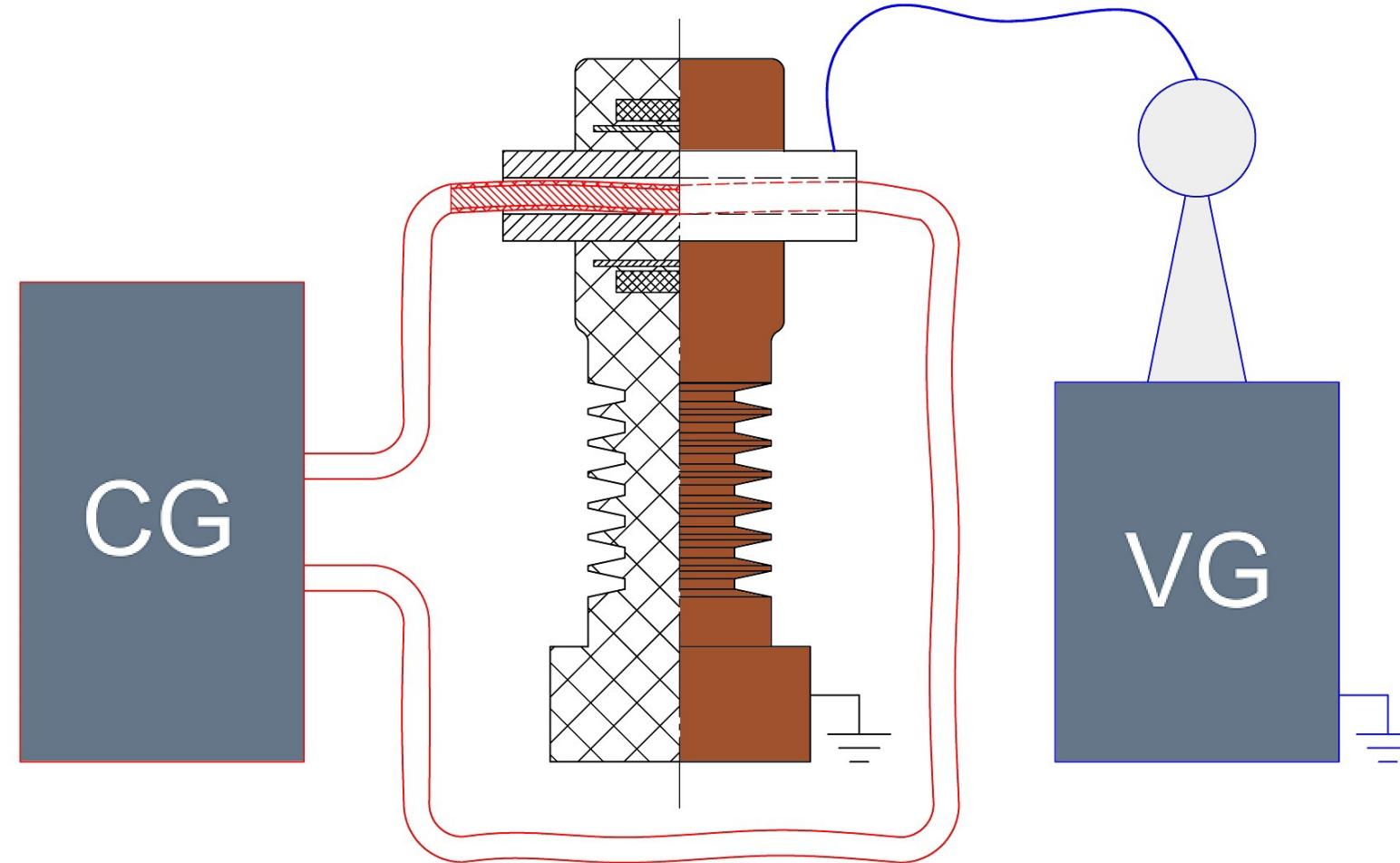
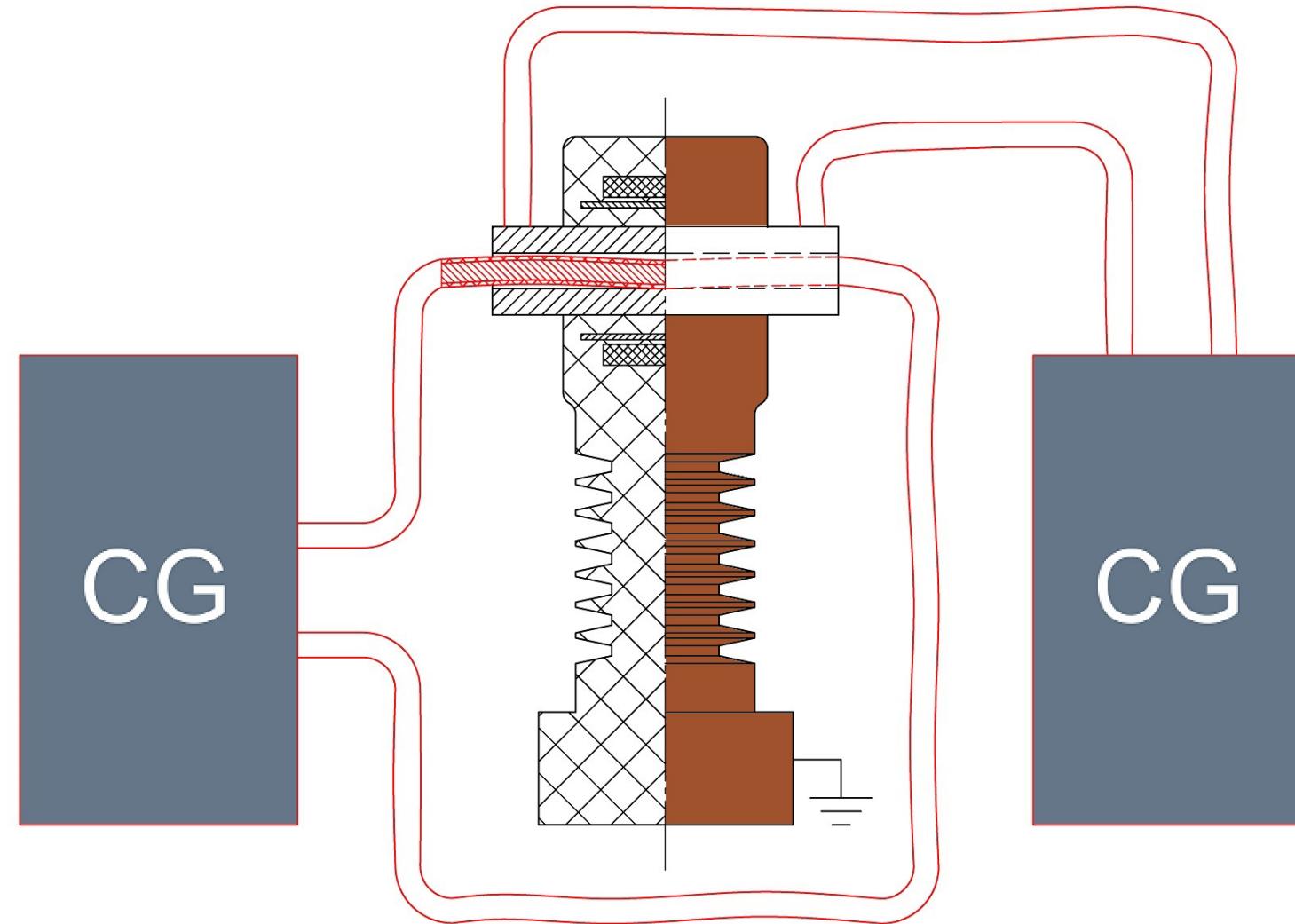


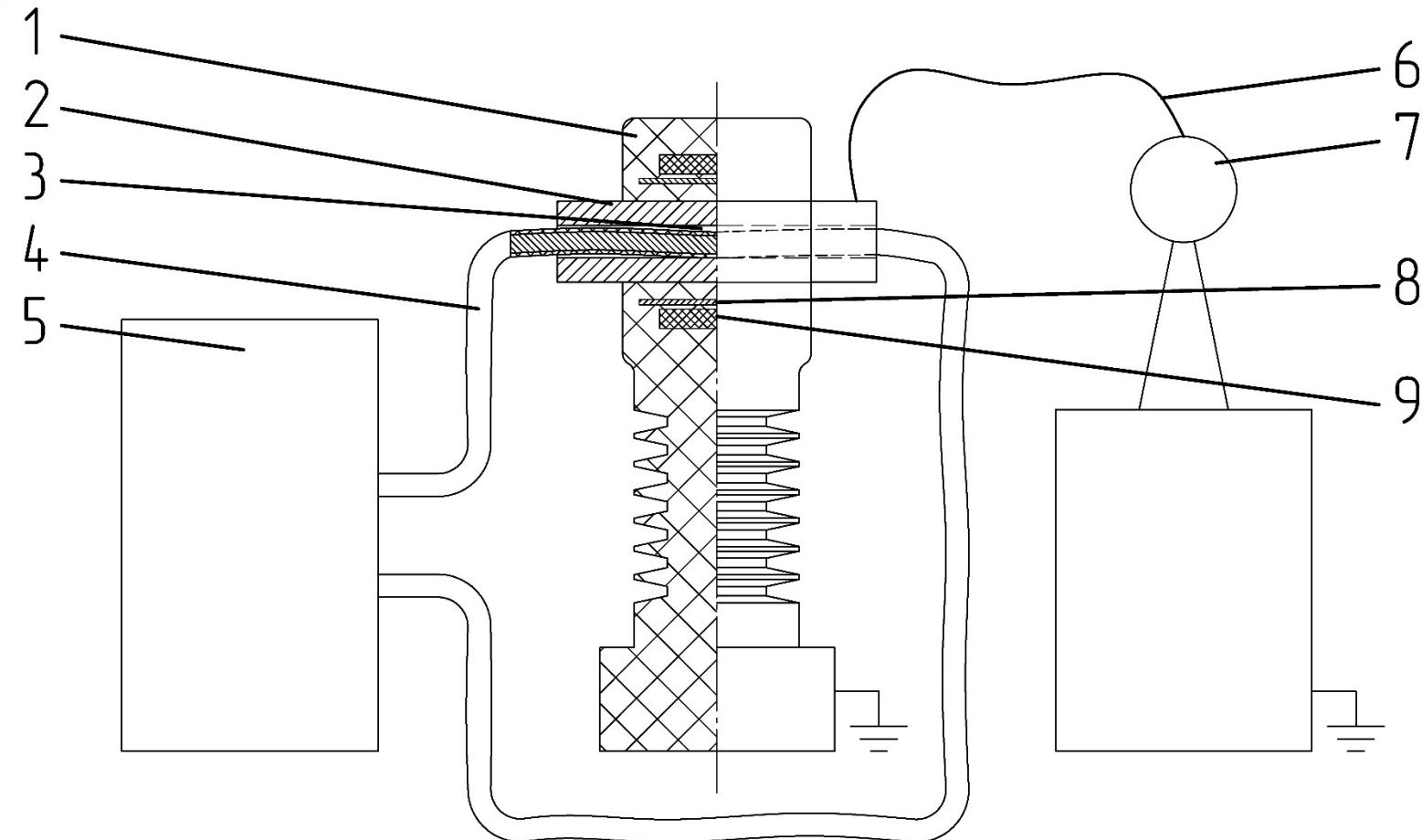


Схема подключения ECIT-1 (ток + ток)





Патент №2 837 035

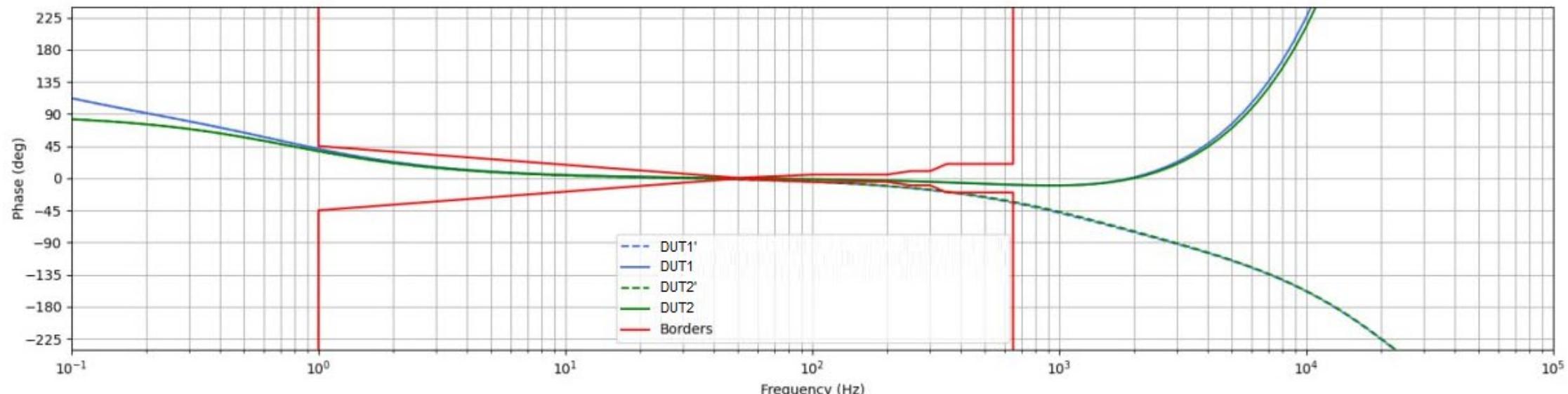
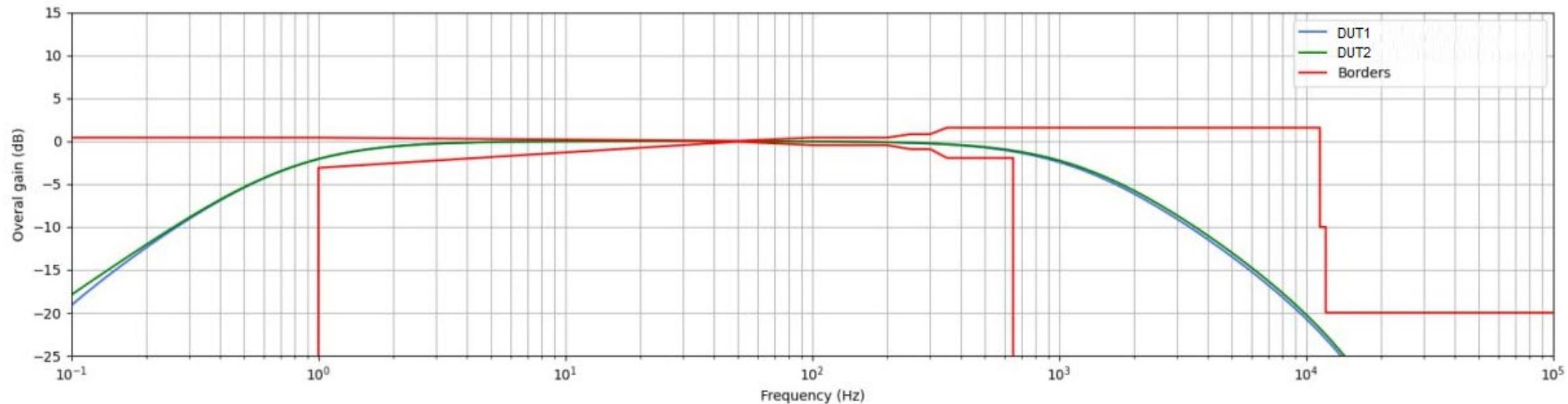


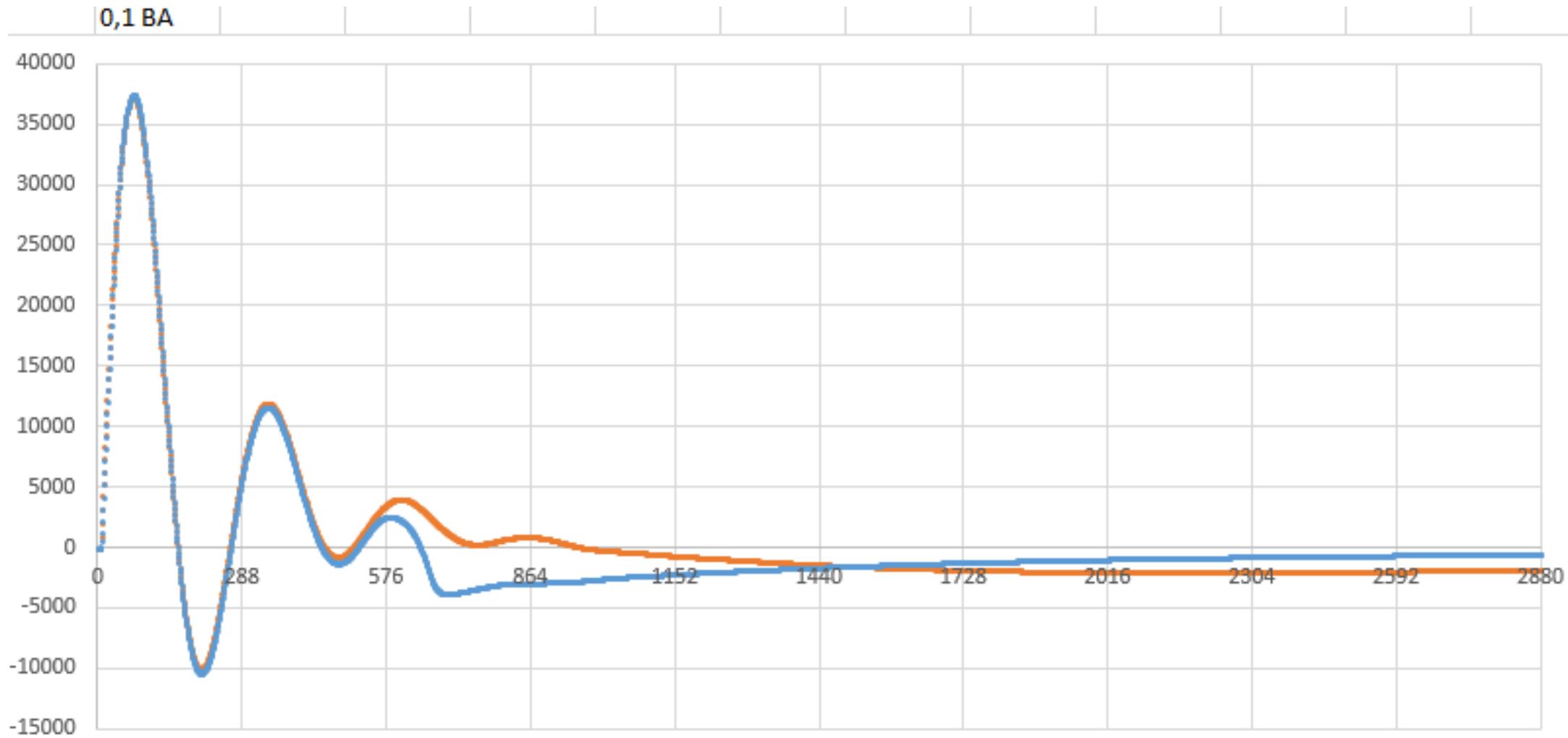
1 – комбинированный измерительный трансформатор
 2 – первичный токопровод трансформатора
 3 – сквозное отверстие
 4 – изолированный провод от генератора тока
 5 – генератор тока

6 – провод от генератора напряжения
 7 – генератор напряжения
 8 – измерительный элемент канала напряжения
 9 – измерительный элемент канала силы тока



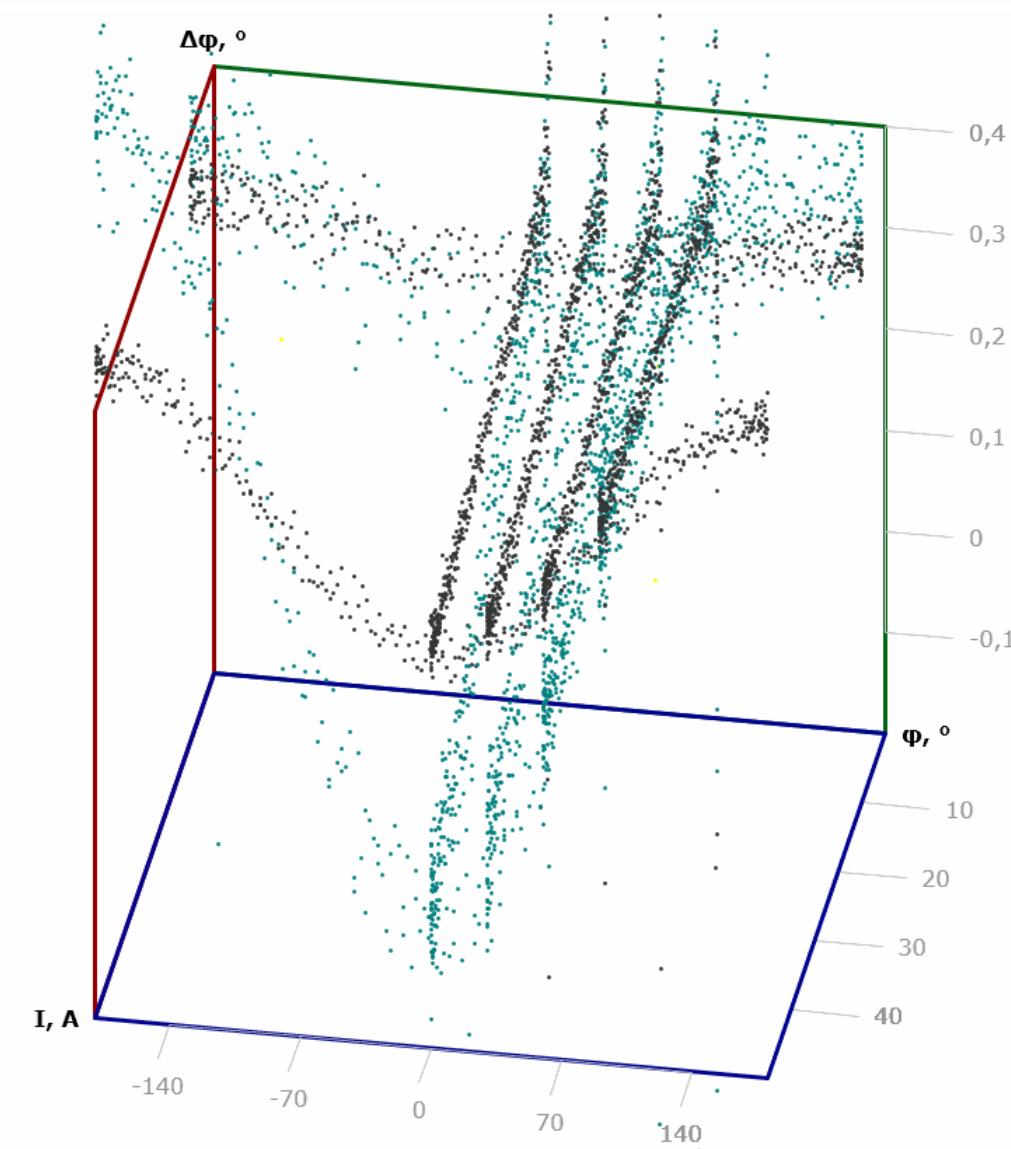
АЧХ, ФЧХ







Погрешность трансформаторной схемы включения





Приведено описание метода испытания оборудования с применением существующего оборудования, позволяющего осуществить одновременную подачу испытательных сигналов с независимых генераторов тока и напряжения.

Способ позволяет снизить материальные затраты, поскольку не требует использования дорогостоящих генераторов, способных выдавать единый сигнал тока и напряжения большой мощности.

Производитель оборудования заинтересован сделать такую конструкцию устройства, чтобы обеспечить возможность выполнения более простой методики испытаний.

Строгое соблюдение требований стандартов и декларирование характеристик позволит разрабатывать и применять новые алгоритмы защиты.



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

Плакидин Роман

Инженер по метрологии

rplakidin@ens.ru



Совершенствование методов испытаний измерительного канала системы РЗА

Р.С. Плакидин¹, Д.Н. Ульянов^{1,2}, П.И. Андреев¹, А.В. Мокеев^{1,2}

¹ООО «Инженерный центр «Энергосервис», ²Северный (Арктический)
федеральный университет
rplakidin@ens.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Методы испытаний, частотные характеристики, измерительный канал, комбинированные измерительные трансформаторы, устройство РЗА.

ВВЕДЕНИЕ

Совершенствование алгоритмов релейной защиты и автоматики (РЗА) приводит к необходимости повышения требований к качеству измерительной информации [1-3]. Включая требования к быстродействию, точности, полосе пропускания измерительных устройств, устройств релейной защиты и автоматики. Современные алгоритмы РЗА требуют выхода за рамки традиционного контроля значений основной гармоники. Необходимый объём измерительной информации дополнительно может включать высшие гармоники, апериодические составляющие, угловые характеристики (для алгоритмов на основе векторов).

В основе любых алгоритмов РЗА лежит измерительная информация, полученная от измерительного оборудования систем РЗА. Качество измерений зависит от всех элементов измерительного канала системы РЗА, включая как первичные измерительные преобразователи (трансформаторы тока и напряжения), так и вторичные преобразователи, находящиеся непосредственно в устройстве РЗА.

В последние годы совершенствуются и сами измерительные преобразователи. В практике измерений электрических величин находят применение первичные и вторичные преобразователи, использующие различные физические принципы: электромагнитную индукцию (катушки Роговского), гальваномагнитные явления (эффект Холла), магниторезистивные и оптические эффекты. Параллельно наблюдается качественное усложнение конструкций и расширение функциональных возможностей измерительных трансформаторов. Применяются маломощные трансформаторы с низкоуровневыми выходами [4, 5], комбинированные измерительные трансформаторы, объединяющие измерение тока и напряжения в одном устройстве [6], трансформаторы с цифровым выходом [7].

От соблюдения предъявляемых к измерениям требований существенно зависит эффективность применения новых алгоритмов устройств РЗА. Для подтверждения соответствия этим требованиям необходимо располагать соответствующими методиками испытаний и техническими средствами для испытаний нового измерительного оборудования систем РЗА. Развитие методов и аппаратных решений в области релейной защиты и противоаварийной автоматики (ПА) неизбежно влечет за собой ужесточение требований к измерительным компонентам систем защиты. И как следствие, к необходимости совершенствования методов и самих испытательных установок для испытаний оборудования РЗА.

В ряде случаев анализ характеристик устройств релейной защиты (РЗА) требует комплексного подхода, выходящего за рамки раздельного исследования защит по силе



тока и напряжению. Для полноценных испытаний необходимо синхронное воздействие комбинированных сигналов тока и напряжения. При проведении испытаний характеристик при работе в переходных процессах [8] – комбинация из периодического синусоидального тока, и затухающей апериодической составляющей. При исследовании характеристик комбинированного трансформатора [8] – комбинация из произвольного сигнала силы тока, и произвольного сигнала напряжения. Для оценки влияния наличия напряжения на измерительный канал силы тока или наличия силы тока на измерительный канал напряжения, с учетом искажений амплитуды и фазового сдвига. Кроме того, имеются сложности в генерации сигнала для определения фактической частотной характеристики в соответствии с IEC-61869-1. Например, при исследовании частотных характеристик [9] или для оценки степени влияния дополнительных гармоник на результат измерения основной гармоники необходимо в испытательном сигнале воспроизвести основную гармонику при наличии высших гармоник.

ТРЕБОВАНИЯ К ЧАСТОТНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ

При проектировании и построении системы релейной защиты и автоматики (РЗА) на современных высокоавтоматизированных подстанциях (ВАПС) могут быть использованы измерительные трансформаторы с цифровым выходом. При выборе их характеристик необходимо учитывать действующие нормативные требования.

Требования к измерительным трансформаторам с цифровым выходом установлены в серии стандартов IEC 61869. В июне 2023 года вышла вторая редакция IEC 61869-1 ED2 [9], которая объединила в себе требования стандартов 61869-1:2007 и 61869-6:2016. В стандарте уточнены и расширены требования к частотным характеристикам (АЧХ, ФЧХ) трансформаторов. В том числе приведена частотная маска, классы точности дополнены требованиями к высшим гармоникам, добавлена возможность корректировки результатов измерений с учетом частотных характеристик. Указанные характеристики влияют на выбор измерительных трансформаторов тока с цифровым выходом для целей релейной защиты.

Стандарт содержит требования к частотным характеристикам, в том числе описание дополнительных классов точности для целей РЗА с учетом большого разнообразия новых алгоритмов устройств РЗА.

Все требования приведенные ниже будут актуальны для маломощных измерительных трансформаторов (ММИТ, LPIT) и трансформаторов с цифровым выходом (в соответствии с требованиями IEC 61869-9:2016 [7]).

Трансформаторы тока малой мощности имеют более широкий спектр применения, чем традиционные электромагнитные трансформаторы тока. Трансформаторы тока малой мощности (такие как оптические трансформаторы тока или катушки Роговского) имеют линейные характеристики и не насыщаются. Их можно применять при аварийных режимах, связанных с большими токами и высокой апериодической составляющей. Однако для работы с таким типом сигналов им требуется активная электронная часть для формирования сигнала. Защиты с применением трансформаторов тока малой мощности могут быть основаны на использовании частоты среза близкой к постоянному току. Апериодическая составляющая может быть отфильтрована, когда как периодический компонент будет преобразован достаточно точно.

Из-за наличия в сети различных нелинейных нагрузок (например оборудования железных дорог, ветреных и солнечных станций) могут генерироваться различные гармоники [10, 11]. Количество и состав гармоник зависит от конфигурации сети и уровня напряжения. Гармоники представляют интерес как для измерительных приложений (измерения, учёт, контроль качества электроэнергии) так и для целей защиты.

Для унификации нормирования частотных характеристик различными производителями стандартом [9] предусмотрен ряд требований: обозначение расширенных классов точности для работы на высоких частотах, соблюдение определенной частотной маски, возможность корректировки измерительного сигнала.



Чтобы дать краткое представление о характеристиках измерительных трансформаторов с точки зрения реакции на наличие гармоник, для каждого класса точности можно использовать дополнительное обозначение расширения класса точности:

- WB0 до 13-й гармоники;
- WB1 для частот до 3 кГц;
- WB2 для частот до 20 кГц;
- WB3 для частот до 150 кГц;
- WB4 для частот до 500 кГц.

Обозначение расширения класса точности для гармоник (для широкой полосы пропускания) указывается совместно с классом точности трансформатора. Например, класс точности 0,5S-WB2 или 5P-WB1.

Для всех маломощных измерительных трансформаторов (LPIT) и устройств сопряжения с шиной процесса (SAMU) должно соблюдаться требования расширенного класса точности WB0, а расширения WB1 – WB4 являются опциональными. Для других типов измерительных трансформаторов все расширения являются опциональными.

Пределы точности для расширений классов точности WB1 – WB4 измерительных трансформаторов приведены в Таблице 8 из стандарта [8] (Перевод приведен в Таблице 1).

Класс точности	Относительная погрешность, % на частотах			Угловая погрешность, ° на частотах		
	$f_r < f \leq 1$ кГц	$1 < f \leq 1,5$ кГц	$1,5 < f \leq 3$ кГц	$f_r < f \leq 1$ кГц	$1 < f \leq 1,5$ кГц	$1,5 < f \leq 3$ кГц
WB1	$f_r < f \leq 1$ кГц	$1 < f \leq 1,5$ кГц	$1,5 < f \leq 3$ кГц	$f_r < f \leq 1$ кГц	$1 < f \leq 1,5$ кГц	$1,5 < f \leq 3$ кГц
WB2	$f_r < f \leq 5$ кГц	$5 < f \leq 10$ кГц	$10 < f \leq 20$ кГц	$f_r < f \leq 5$ кГц	$5 < f \leq 10$ кГц	$10 < f \leq 20$ кГц
WB3	$f_r < f \leq 20$ кГц	$20 < f \leq 50$ кГц	$50 < f \leq 150$ кГц	$f_r < f \leq 20$ кГц	$20 < f \leq 50$ кГц	$50 < f \leq 150$ кГц
WB4	$f_r < f \leq 50$ кГц	$50 < f \leq 150$ кГц	$150 < f \leq 500$ кГц	$f_r < f \leq 50$ кГц	$50 < f \leq 150$ кГц	$150 < f \leq 500$ кГц
0,1	±1	±2	±5	±1	±2	±5
0,2 – 0,2S	±2	±4	±5	±2	±4	±5
0,5 – 0,5S	±5	±10	±10	±5	±10	±20
1,0	±10	±20	±20	±10	±20	±20
Защита	±10	±20	±30	-	-	-

Классы точности 0,2S и 0,5S применимы только для трансформаторов тока

Табл. 1: Требования стандарта [8] к частотным характеристикам измерительных трансформаторов для классов точности WB1 – WB4 с широкой полосой пропускания

Расширение класса точности WB4 предназначено для защит, требующих очень широкой полосы пропускания (включая методы бегущей волны и определение места повреждения), где частоты сигналов достигают 500 кГц. Использование защит, основанных на анализе бегущей волны, является перспективным решением, обеспечивающим очень точное определение места повреждения. Эта область все еще развивается, но ТТ и ТН, подходящие для этих защит, требуют очень широкого диапазона частот. Поэтому в стандарте предусмотрели этот «расширенный» диапазон до 500 кГц.

Существующие электромагнитные измерительные трансформаторы не имеют достаточной полосы пропускания, позволяющей терминалам защиты точно определять место повреждения методами бегущей волны.

Следует отметить, что расширение классов точности WB2 – WB4 несовместимы с цифровыми сигналами, предназначенными для целей защиты, предусмотренными в стандарте [6] из-за низкой частоты дискретизации (4800 Гц).

Для всех защитных классов точности требования к гармоникам таблицы 9 из стандарта [9] (перевод приведен в Таблице 2) являются обязательными, а требования к



гармоникам таблицы 8 – опциональными. Частоты 16,7 Гц или 20 Гц требуются для работы с воздействиями, исходящими от оборудования железнодорожной сети (для электрических сетей с номинальными частотами 50 Гц или 60 Гц соответственно).

Относительная погрешность на низких частотах	Относительная погрешность на гармониках кратных f_r		Угловая погрешность на низких частотах	Угловая погрешность на гармониках кратных f_r	
%			°		
DC	1 Гц	1/3 (16,7 Гц или 20 Гц)	2 – 5	1 Гц	1/3 (16,7 Гц или 20 Гц)
+10	+10	±10	±10	-	±10
-100	-30				±10

Табл. 2: Требования стандарта [8] к частотным характеристикам измерительных трансформаторов для целей защиты

Цифровая обработка данных и дискретизация по времени ограничивает полосу пропускания менее чем половиной частоты дискретизации f_s (критерий Найквиста). Если в процессе преобразования и обработки сигнала используются разные частоты дискретизации, то ограничивающим фактором является наименьшая частота из них. Для измерительных трансформаторов с цифровым выходом самой низкой частотой как правило является частота дискретизации выходного сигнала (4800 Гц для целей защиты). Частоты выше $f_s/2$ зеркально отображаются на частотах ниже $f_s/2$. С точки зрения точности наиболее критическими частотами являются частоты, кратные частоте сети f_r (кратные гармоникам). Частота, кратная частоте сети f_r – это частота $(f_s - f_r)$.

Следовательно, необходимо использовать так называемый антиалиасинговый фильтр. Минимальные требования к затуханию указаны в зависимости от класса точности измерительного трансформатора в Таблице 10 стандарта [7] (перевод приведен в таблице 3).

Класс точности	Затухание антиалиасингового фильтра для частот до 13 гармоники	Затухание антиалиасингового фильтра для основной частоты	$f_s - 13 \cdot f_r < f \leq f_s - f_r$
			$f_s - f_r \leq f$
0,1	≥ 17 дБ	≥ 34 дБ	
0,2	≥ 14 дБ	≥ 28 дБ	
0,5	≥ 10 дБ	≥ 20 дБ	
1,0	≥ 10 дБ	≥ 20 дБ	
Защита	≥ 10 дБ	≥ 20 дБ	

Табл. 1: Требования стандарта [8] к антиалиасинговому фильтру

Совокупность обязательных требований (с учетом заявленного класса точности, частоты дискретизации, расширенного диапазона по частоте) указанных выше составляют некоторую частотную маску, которой должны соответствовать измерительные трансформаторы.

Например, на рисунке 1 показана частотная маска с учетом требований стандарта для маломощного измерительного трансформатора тока с цифровым выходом класса точности для защиты 5Р, $f_r = 50$ Гц, $f_s = 4800$ Гц.

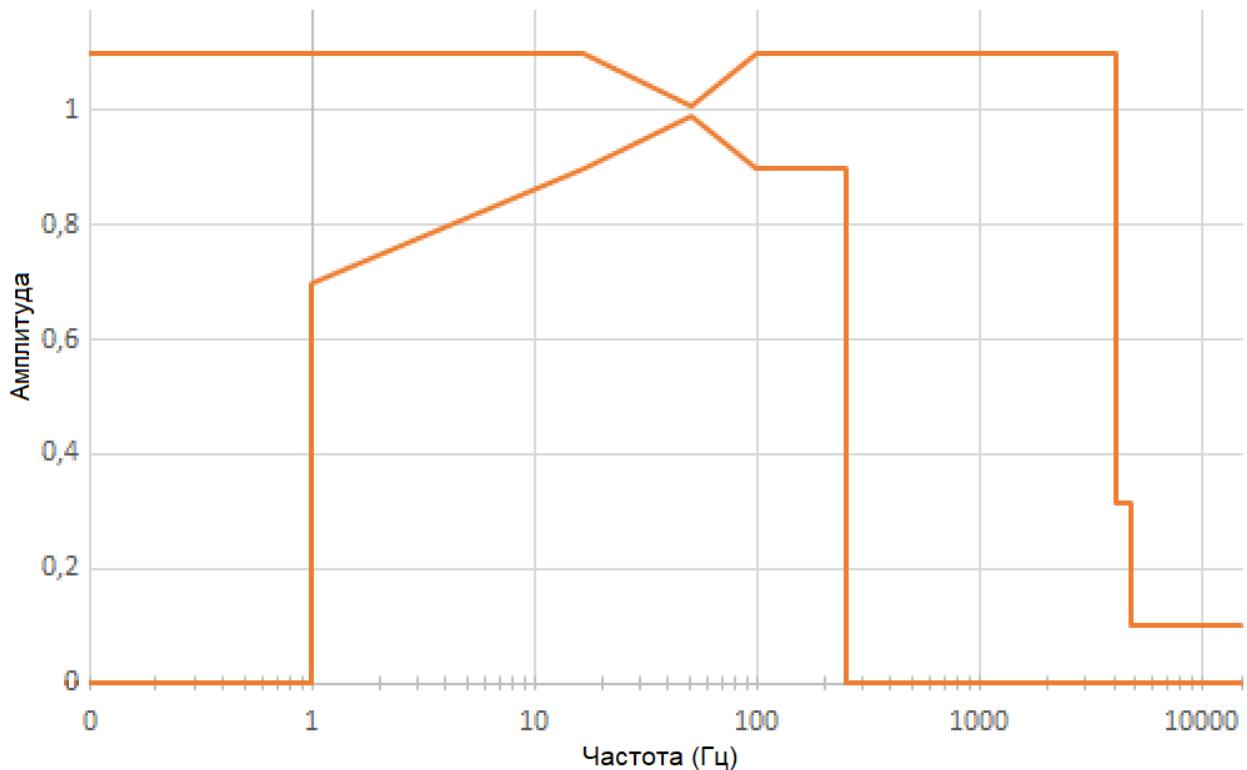


Рис. 1: Частотная маска для защитного класса точности защиты 5Р

При проектировании систем РЗА с применением современных алгоритмов, большое значение имеет наличие достоверной информации об АЧХ и ФЧХ всех компонентов измерительного канала. Однако производители оборудования не предоставляют такие данные. В том числе из-за отсутствия стандартизованных методик испытаний частотных характеристик и самих испытательных установок для воспроизведения комбинированных сигналов тока, содержащих гармонические составляющие.

МЕТОДЫ ГЕНЕРАЦИИ КОМБИНИРОВАННОГО СИГНАЛА

Например, в процессе исследования характеристик комбинированного трансформатора тока и напряжения ECIT-1 [12] необходимо провести все указанные выше испытания. При этом конструкция данных трансформаторов не предусматривает возможности отдельного подключения первичных цепей тока и напряжения, и имеет общий токопровод (первичный высоковольтный ввод), к которому в условиях эксплуатации подключается высоковольтная линия.

В настоящий момент широко применяются генераторы тока, которые позволяют подать от 0 до 6000 А, и генераторы напряжения, которые позволяют подавать от 0 до 35000 В, с обеспечением необходимой точности. При этом типичная полная мощность таких генераторов не превышает 2 кВт. Однако, задача подать одновременно хотя бы 500 А и 2000 В не имеет простого решения, поскольку полная мощность такого генератора сигнала будет более 1 МВт. При этом сложность заключается не только в выдаче требуемой мощности из электросети, но и в самой адаптации электрооборудования питающей сети к переходным процессам, возникающим при проведении подобных испытаний.

Другой путь для подачи комбинации сигналов с двух генераторов при использовании схемы подключения с применением разделительных трансформаторов большой мощности для подключаемых первичных цепей от отдельных стандартных генераторов тока и напряжения. Что проще в сравнении с предыдущим способом, однако тоже является не простой технической задачей.



Еще одним способом, описанный в патенте [13] – на этапе проектирования устройства необходимо предусмотреть соответствующую конструкцию испытуемого изделия для возможности подключения как совместное, так и отдельное подключение первичных цепей. Например, конструкцией комбинированного измерительного трансформатора ЕСИТ-1 предусмотрено сквозное отверстие в первичном токопроводе, через которое в процессе испытаний пропускают изолированный провод от генератора тока, подключают провод от генератора напряжения к первичному токопроводу, выполняют одновременную подачу сигналов тока и напряжения с независимых генераторов. Затем проводят проверку характеристик одновременно по каналу тока и каналу напряжения, оценивают взаимное влияние токов и напряжений.

На рисунке 2 изображен комбинированный измерительный трансформатор тока и напряжения ЕСИТ-1 1, включающий первый токопровод 2 с отверстием 3, через которое пропущен изолированный провод 4 от генератора тока 5, измерительные элементы канала тока 9, измерительные элементы канала напряжения 8, провод 6 от генератора напряжения 7. Ось сквозного отверстия 3 совпадает с осью цилиндра первичного токопровода. Сечение первичного токопровода 2 с отверстием соответствует установленным требованиям по допустимому длительному току. Внешняя изоляция проводов 4 генератора тока 5 обеспечивает необходимый уровень изоляции. Сила тока в комбинированных измерительных трансформаторах тока и напряжения измеряется бесконтактным способом, принцип измерения построен на измерении величины магнитного поля, создаваемого током в первичной цепи трансформатора. При подаче испытательного сигнала тока на провода 4, пропущенные через отверстие 3, ток воздействует на измерительные элементы канала тока 9 также, как при подаче сигнала с такими же характеристиками (по амплитуде, частоте, фазовому углу, форме сигнала) на первичный токопровод 2. Максимальный подаваемый генератором ток ограничен только сечением пропускаемого через отверстие в первичном токопроводе проводника и длительностью воздействия.

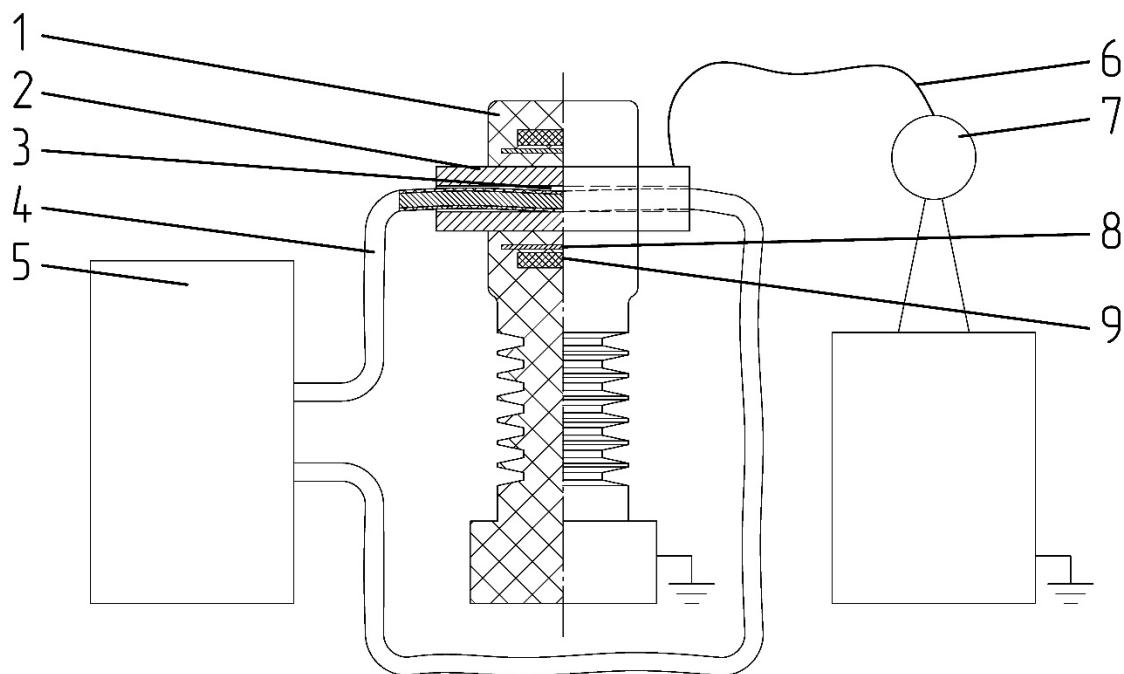


Рис. 2: Схема подключения испытуемого оборудования

Цепи 6 от генератора напряжения 7 подключаются непосредственно к первичному токопроводу 2, являющимся также высоковольтным вводом. Измерение напряжения проводится измерительными элементами канала напряжения 8.



Тем самым, не нарушая принцип измерения, заложенный в основу комбинированного измерительного трансформатора тока и напряжения с общим первичным токопроводом, имеется возможность одновременно подать сигнал с независимых источников тока и напряжения.

Данный способ позволяет подать комбинированный сигнал тока от двух генераторов силы тока. Для этого сигнал от первого генератора подают на изолированный провод пропущенный через отверстие в первичном токопроводе, а сигнал от второго генератора тока подают непосредственно на первичный токопровод комбинированного трансформатора. Что позволяет в частном случае имитировать сигнал силы тока в переходном процессе состоящий из периодического сигнала с первого генератора и апериодического сигнала со второго генератора. В этом случае трансформатор тока будет воспринимать комбинацию поданных сигналов, что может быть использовано при проведении испытаний на соответствие классам точности в переходном режиме по международному стандарту IEC 61869-2 [7]. Либо подать комбинацию двух сигналов тока с синхронизированных генераторов: основной частоты с одного генератора и произвольную гармонику со второго генератора. Это позволяет исследовать частотные характеристики устройств.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведено описание метода испытаний оборудования с использованием стандартных генераторов, обеспечивающих синхронную и независимую подачу комбинированных сигналов тока и напряжения.

Ключевые преимущества предложенного решения:

- Снижение материальных затрат на испытательные процедуры без потери точности измерений за счет отказа от дорогостоящих специализированных генераторов высокой мощности;
- Возможность формирования сложных сигналов, включая многокомпонентные токовые сигналы и комбинацию из силы тока и напряжения.

Производители оборудования заинтересованы сделать конструкцию устройства таким, чтобы обеспечить возможность выполнения более простой методики испытаний.

Реализация данного подхода позволяет оптимизировать процесс испытаний оборудования и обеспечить соответствие современным требованиям стандартов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Фадке А.Г., Торп Д.С. Компьютерная релейная защита в энергосистемах. М, Техносфера, 2019. 370 с.
- [2] Антонов В.И. и др. Основы релейной защиты и автоматики интеллектуальной электрической сети. Москва, Вологда, Инфра-Инженерия, 2023. 324 с.
- [3] Мокеев А.В., Пискунов С.А. Дистанционная защита на основе одностороннего и двухстороннего измерения синхровекторов. Релейная защита и автоматизация, 2024, № 1 (54). С. 8-15.
- [4] IEC 61869-7 Specific requirements for electronic Voltage Transformers, 2025
- [5] IEC 61869-8 Specific requirements for Electronic Current Transformers, 2025
- [6] IEC 61869-4:2013 Additional requirements for combined transformers, 2014
- [7] IEC 61869-9:2016. Digital interface for instrument transformers, 2016
- [8] IEC 61869-2:2012 ED2. Additional requirements for current transformers, 2022
- [9] IEC 61869-1:2023 ED2. General requirements, 2023
- [10] IEC TR 61000-3-6:2008 EMC. Limits. Assessment of emission limits for the connection of distorting installations to MV, HV and EHV power systems
- [11] IEEE 519-2022 Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems



- [12] Комбинированный измерительный трансформатор ECIT-1. Описание типа. Регистрационный номер в ФИФ 94207-24
- [13] Патент РФ № 2837035 «Способ проверки метрологических характеристик комбинированного измерительного трансформатора тока и напряжения» – 2024