

ДИСТАНЦИОННАЯ ДИАГНОСТИКА ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИЗОЛЯТОРОВ

*А.В. Голенищев-Кутузов, В.А. Голенищев-Кутузов, Г.Д. Марданов,
Р.А. Хуснутдинов, И.А. Евдокимов*

Разработан комплексный двухканальный метод дистанционной диагностики рабочего состояния высоковольтных изоляторов, который основан на одновременной регистрации и компьютерной обработке сигналов частичных разрядов, детектированных электромагнитным и акустическим датчиками. С помощью созданного на этом методе устройства были установлены диагностические признаки, позволяющие отличать работоспособные изоляторы от дефектных в реальных условиях их эксплуатации.

Ключевые слова: дистанционная диагностика, частичные разряды, высоковольтные изоляторы, акустические и электромагнитные датчики.

ВВЕДЕНИЕ

Устойчивость работы современного энергетического оборудования высокого напряжения во многом определяется надежностью его изолирующих элементов. Наиболее уязвимыми в этом плане являются высоковольтные изоляторы (ВИ), поскольку при длительном воздействии высокого напряжения и неблагоприятных условий эксплуатации возникает преждевременное старение керамических или полимерных изоляционных материалов. В результате происходит образование различных дефектов, приводящих в конечном итоге к электрическому пробое и даже полному разрушению ВИ. В настоящее время отсутствуют какие-либо нормативные документы, регламентирующие контроль наличия дефектов, измерения их параметров и влияния на рабочее состояние ВИ, находящихся под высоким напряжением. Согласно последнему ГОСТу Р 191—2012 [1] и Международному стандарту IEC 60060—1.2010 [2], предусматриваются только периодические испытания высоковольтного энергетического оборудования с выводом из рабочего состояния. В основу определения параметров дефектов и их влияния на работоспособность изоляции положен электрический контактный метод измерения характеристик частичных разрядов (ЧР) с помощью специализированных для каждого вида оборудования стендов с использованием регулируемых источников высокого напряжения. Как известно [3], полному пробое, как правило, предшествуют микропробои или электрические разряды, которые шунтируют лишь часть изоляции между электродами, получившие название частичных разрядов. Они являются результатом возникновения в процессе эксплуатации локальных повышений напряженности приложенного электрического поля в объеме или на поверхности

Александр Вадимович Голенищев-Кутузов, доктор физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой «Промышленная электроника и светотехника» ФГБОУ ВПО «Казанский государственный энергетический университет». Тел. 8(843)519-42-78, 89172500635. E-mail: alex.kutuzov@mail.ru

Вадим Алексеевич Голенищев-Кутузов, доктор физ.-мат. наук, профессор кафедры «Промышленная электроника и светотехника» ФГБОУ ВПО «Казанский государственный энергетический университет». Тел. 8(843)519-42-78.

Георгий Дамирович Марданов, аспирант кафедры «Промышленная электроника и светотехника» ФГБОУ ВПО «Казанский государственный энергетический университет». Тел. 8(843)519-42-78. E-mail: mardanov1992@mail.ru

Раиль Алексеевич Хуснутдинов, аспирант кафедры «Промышленная электроника и светотехника» ФГБОУ ВПО «Казанский государственный энергетический университет». Тел. 8(843)519-42-78.

Игорь Анатольевич Евдокимов, главный инженер филиала ОАО «Сетевая компания», Казанские электрические сети. Тел. 8(843)2918585.

изоляции, превышающей ее электрическую прочность. Возрастание размеров дефектов под действием разнообразных факторов сопровождается увеличением интенсивности и числа ЧР в конкретные временные интервалы, а также понижением напряженности поля для возникновения ЧР, последнее эквивалентно изменению фазы переменного рабочего напряжения. Именно измерение этих характеристик положено в основу ГОСТа. Вследствие вероятностного характера возникновения ЧР их характеристики отличаются большим разнообразием и реально можно устанавливать только усредненные параметры, позволяющие отличать работоспособные изоляторы от дефектных, требующих замены [4].

Методы измерения различных характеристик ЧР дают возможность обнаруживать дефекты на ранней стадии их возникновения, отслеживать их развитие и таким образом оценивать текущее состояние изоляционных элементов, что отражено в отечественных и международных документах и стандартах. ГОСТом Р 55191—2012 предусмотрено измерение только контактным способом на стенде двух основных характеристик отдельных ЧР: кажущегося заряда (интенсивности), напряжения его возникновения и, при необходимости, нескольких дополнительных характеристик (скорости, частоты повторения, среднего тока и мощности). Как показали эксперименты, этих характеристик недостаточно для оценки рабочего состояния ВИ в процессе эксплуатации. Как отмечено в указанном ГОСТе, максимально допустимое значение какой-либо характеристики ЧР (при большой номенклатуре электротехнических изделий) устанавливается дополнительным отраслевым нормативом на оборудование конкретного типа. Однако пока технические нормативы для ВИ не разработаны. Практически и в наши дни повреждения ВИ в виде видимых трещин, сколов, пробоев определяются на работающем оборудовании в основном визуально, причем с учетом того, что дефекты сантиметровых размеров по-разному влияют на дальнейшую работоспособность ВИ в зависимости от материала, размеров и приложенного высокого напряжения.

В современных условиях возникла существенная необходимость дистанционного бесконтактного контроля рабочего состояния высоковольтного оборудования, особенно ВИ, на что неоднократно указывалось в ведомственных документах [5]. Однако до сих пор нет нормативных материалов по дистанционному контролю ВИ, а существуют отдельные попытки использования для контроля энергетического оборудования различных методов измерения ЧР, причем в основном для контроля силовых трансформаторов [6—9].

ЧР сопровождаются излучением коротких (длительностью от 10^{-7} до 10^{-10} с) электромагнитных импульсов в широком частотном диапазоне от 10^5 до 10^{17} Гц и акустических импульсов в диапазоне от 20 Гц до 200 кГц. Для дистанционной регистрации таких излучений были разработаны соответствующие методы, каждому из которых присущи как определенные достоинства, так и существенные недостатки. Электромагнитный метод (при высокой чувствительности) подвержен сильному влиянию радиочастотных помех и электрических разрядов от работающего оборудования на точность измерений ЧР; акустический способ имеет высокую помехоустойчивость от электромагнитных полей и хорошую разрешающую способность к обнаружению дефектного изолятора и в ряде случаев даже места дефекта, что сочетается с малой чувствительностью; оптические и термографические методы эффективны только при отсутствии солнечной засветки и работают в определенном температурном интервале окружающей среды [3].

Следует отметить, что при дистанционном контроле важную роль имеет расстояние от измерительных датчиков до ВИ, которое составляет для подвесных изоляторов на воздушных линиях передачи $r \geq 30$ м, а для опорных

ВИ, используемых в распределительных устройствах станций и подстанциях, — примерно 6—8 м. В этом случае наиболее важными характеристиками электромагнитных и акустических датчиков в виде параболических или линейных антенн являются разрешающая способность для выделения дефектных изоляторов и чувствительность соответствующих приемников. Существует значительное различие в угловых разрешающих способностях (θ) для электромагнитных и акустических волн, с учетом разницы в скоростях распространения этих волн и соответствующих длин волн λ , поскольку θ пропорционально λ/D , где D — диаметр или линейный размер антенны. С учетом особенностей распространения электромагнитных и акустических волн (для акустических волн — это дальняя зона, а для электромагнитных волн — ближняя зона распространения) линейное разрешение для электромагнитного датчика составляет 5—2 м при $r = 30—10$ м, а для акустического датчика — 1—0,3 м соответственно. Следовательно, в настоящее время даже с использованием совершенных направленных антенн и усилителей невозможно указанными способами, а также с использованием тепловизоров определять места и тем более размеры дефектов дистанционно. Существует только возможность выделения одиночных дефектных изоляторов в пределах до 100 м электромагнитным датчиком, а выделение дефектных изоляторов внутри групп возможно только при одновременном применении электромагнитных и акустических способов на расстоянии до 10—15 м.

Отсюда следует вывод, что успешный контроль состояния изолирующих элементов высоковольтного оборудования возможен только при одновременном использовании нескольких рассмотренных выше методов. Однако в настоящее время практически все выпускаемые промышленностью диагностические приборы (как отечественные, так и зарубежные) рассчитаны в основном на использование одного метода — акустического или термографического, которые пока нашли применение для контроля изоляции высоковольтных силовых трансформаторов и кабелей.

Таким образом, неразработанность реальных методик и отсутствие нормативных документов по контролю и диагностике рабочего состояния ВИ стали главной причиной для разработки более совершенного комплексного метода оперативного контроля рабочего состояния ВИ, сочетающего одновременную дистанционную регистрацию ЧР с помощью электромагнитного и акустического датчиков и компьютерной обработки результатов. Как показали предварительные исследования [10, 11], разработанный метод способен определять необходимые характеристики ЧР и отображать их в виде распределения амплитуды и числа ЧР в зависимости от фазы рабочего напряжения и распределения их числа по интенсивности.

СТРУКТУРА ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЯ И МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЙ

Регистрация электромагнитных импульсов ЧР (рис. 1) осуществляется направленной антенной AOR LA380, соединенной с широкополосным преобразованным приемником AOR AR 5000A, позволяющим детектировать импульсы в интервале частот 0,5—600 МГц. Регистрация акустических импульсов осуществляется активной параболической антенной, соединенной с приемником SDT-270 на частоте 40 кГц. Выбор частоты измерений был обоснован такими факторами, как частотная зависимость затухания волн, производственные шумы и электромагнитные помехи окружающего электрического оборудования. Так, акустические шумы доминируют в низкочастотной области (20 Гц—20 кГц), верхний частотный предел ограничен частотной зависимостью затухания ($f \geq 100$ кГц). В интервале 35—45 кГц, как показали эксперименты, при отношении сигнал/шум ≈ 2 акустические

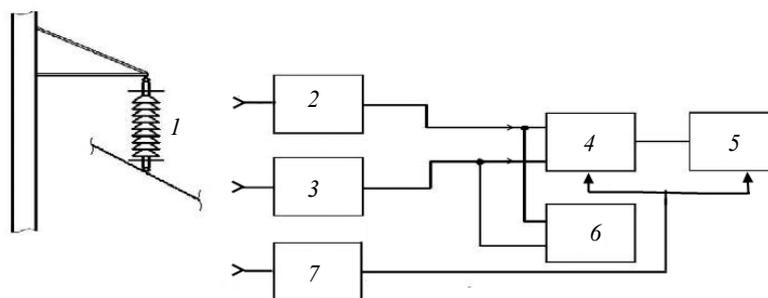


Рис. 1. Блок-схема измерительного устройства:

1 — высоковольтный изолятор; 2 — приемник электромагнитных сигналов; 3 — приемник акустических сигналов; 4 — аналого-цифровой преобразователь; 5 — персональный компьютер; 6 — двухтактный осциллограф; 7 — приемник опорного сигнала для регистрации фазы.

импульсы от ЧР регистрируются на расстоянии 15—25 м. С учетом низкочастотных производственных электромагнитных помех в диапазоне 50—200 и выше 600 МГц наиболее предпочтительными для электромагнитной регистрации ЧР являются полосы 20—50 и 400—550 МГц, причем интенсивность сигналов ЧР значительно выше во второй полосе, чем в первой.

Далее усиленные сигналы от приемников поступают на двухканальный цифровой осциллограф DSO3062A, выполняющий функцию непосредственного отображения сигналов с электромагнитного и акустического датчиков в виде амплитудно-фазовых характеристик импульсов ЧР. Затем синхронизированные с фазой переменного напряжения сети сигналы ЧР поступают на плату сбора данных АЦП NIUSB 6341, оцифрованные сигналы от электромагнитного и акустического приемников поступают в компьютер, в котором с помощью разработанной программы [11] происходит сбор, запись, обработка информации об амплитуде, частоте повторения и фазе сигналов. Накопление сигналов по узким фазовым интервалам (порядка 20 град) происходит в течение 18 с и вполне удовлетворяет стохастическому характеру возникновения ЧР. Процесс обработки сигналов ЧР заканчивается построением амплитуд и числа импульсов в каждом фазовом интервале и распределением числа импульсов по амплитудам.

Полученное фазовое распределение параметров импульсов сравнивается с ранее записанным распределением параметров импульсных сигналов для бездефектного ВИ того же типа. Поскольку скорости распространения электромагнитных и акустических импульсов отличаются на несколько порядков, то для их синхронизации с каждым конкретным фазовым интервалом используется блок фазовой синхронизации, учитывающий расстояние между дефектом и датчиком.

Определение реального значения интенсивности отдельного частичного разряда выполняется после градуировки приемников электромагнитных и акустических сигналов с использованием контактного датчика по способу, приведенному в ГОСТе Р 55101—2012, с учетом расстояния между антенной и источником ЧР, определяемых лазерным дальномером.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Разработанный комплексный метод и устройство были испытаны в стендовом варианте на кафедре промышленной электроники и светотехники КГЭУ на серии снятых с эксплуатации работоспособных и дефектных полимерных изоляторов типа ЛК70/35. Изоляторы № 1—4 до снятия с эксплуатации, как следует из предварительного изучения в Казанских

электрических сетях, не имели каких-либо макродефектов и вполне соответствовали нормам эксплуатации (условно бездефектные изоляторы). Изоляторы № 5—8 содержали различные дефекты (сквозные пробои защитной оболочки, разрядные треки вдоль стержней, между стержнем и оконцевателем), что свидетельствовало о наличии серьезных дефектов и невозможности их дальнейшей эксплуатации.

Измерения, проводившиеся на расстоянии порядка 6 м от изоляторов, показали хорошую сопоставимость результатов, полученных электромагнитным и акустическим методами для каждого изолятора, с характеристиками ЧР, полученными с помощью контактного метода, отклонения не превышали 25—30 %, что связано в основном с использованием различных частотных диапазонов.

Характеристики ЧР для работоспособного (№ 3) и дефектного (№ 5) ВИ, типичные для обеих групп изоляторов, приведены на рис. 3—5. Как следует из рис. 3 и 4, количественное значение интенсивности ЧР и их числа в отдельных фазовых интервалах различалось не более чем в 1,5 раза, что связано с методами их детектирования, однако положение их максимальных фазовых интервалов полностью совпадало для электромагнитного и акустического методов. Визуально на изоляторе № 5 наблюдался дефект в виде повреждения стеклопластикового стержня (рис. 2).

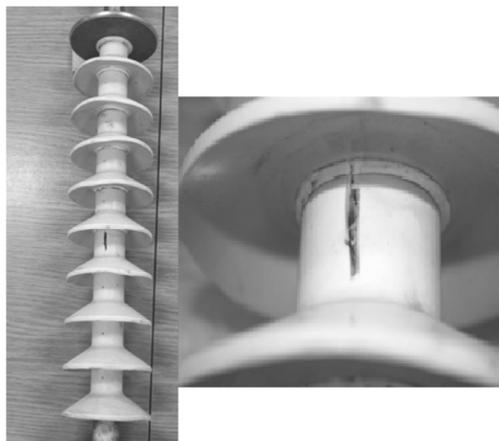


Рис. 2. Изолятор ЛК70/35 № 5 с повреждением стеклопластикового стержня и полимерной оболочки.

Различие в интенсивности и числе ЧР в фазовых интервалах с наибольшей интенсивностью, фазовом распределении этих интервалов внутри каждой группы ВИ составляло не более чем в 1,2 — 1,5 раза, а между группами работоспособных и дефектных ВИ — не менее чем в 3—5 раз. Более того, в первой группе ВИ (бездефектные) не наблюдались ЧР с интенсивностью, превышающей 100 пКл, в то время как для второй группы характерны отдельные ЧР с интенсивностью до 1—2 нКл. На основе анализа характеристик ЧР для ВИ комплексным методом была разработана методика дистанционной диагностики состояния ВИ, основанная на одновременном детектировании и совместной компьютерной обработке электромагнитных и акустических сигналов от ЧР. При этом процессе в каждом из дискретных фазовых интервалов высокого напряжения определяются средние значения интенсивности и число импульсов реального заряда, которые превышают допустимый порог для возникновения дефектов или их развития по сравнению с эталонным ВИ. Причем для повышения достоверности при оценке рабочего состояния ВИ измеряется фазовый сдвиг интервалов числа ЧР с наибольшими интенсивностями в зависимости от степени дефектности.

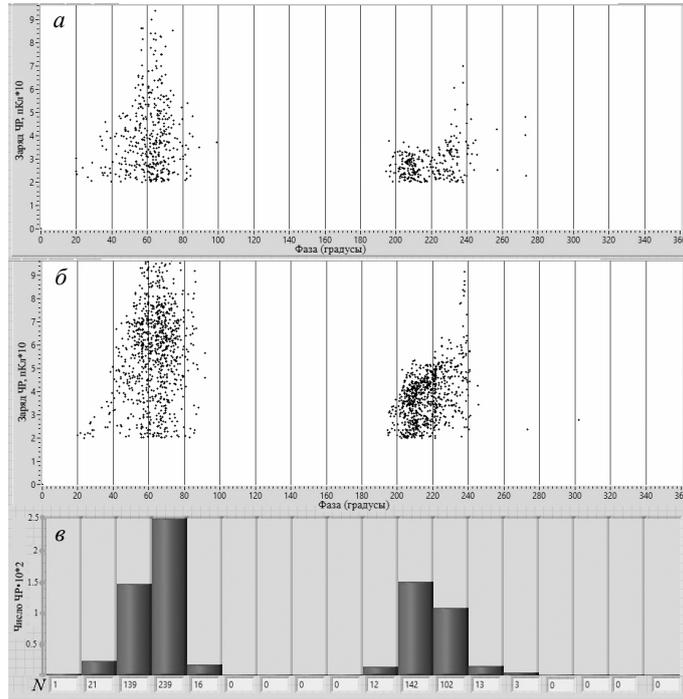


Рис. 3. Характеристики ЧР для работоспособного бездефектного изолятора № 3: *a* и *б* — амплитудно-фазовые характеристики, детектированные электромагнитным (*a*) и акустическим (*б*) датчиками; *в* — фазовое распределение количества (*N*) ЧР, детектированных электромагнитным датчиком.

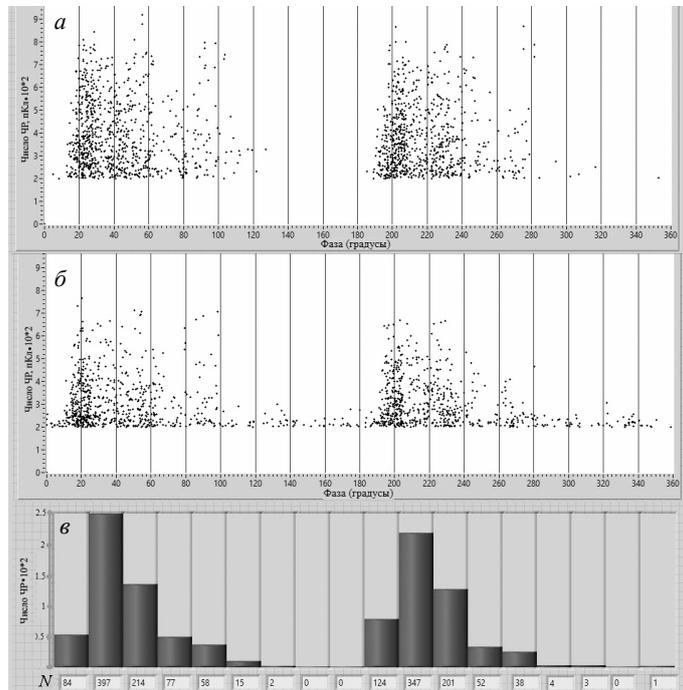


Рис. 4. Характеристики ЧР для дефектного изолятора № 5: *a* и *б* — амплитудно-фазовые характеристики, детектированные электромагнитным (*a*) и акустическим (*б*) датчиками; *в* — фазовое распределение количества (*N*) ЧР, детектированных электромагнитным датчиком.

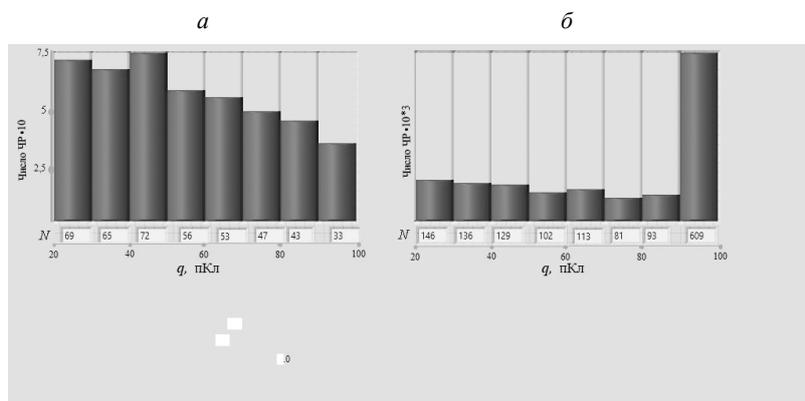


Рис. 5. Распределение числа ЧР по интенсивностям для бездефектного (а) и дефектного (б) изоляторов.

Нами предложено разбраковку работоспособных и неработоспособных ВИ в процессе эксплуатации выполнять по следующим наиболее существенным отличиям в характеристиках ЧР, полученным комплексным методом по степени значимости:

значительное (не менее чем в 5—8 раз) увеличение интенсивности и числа ЧР, превышающих средние их значения, $q \sim 10\text{—}20$ пКл, $N \sim 100\text{—}200$ за наиболее интенсивный дискретный фазовый интервал;

превышение интенсивности ЧР более чем 100 пКл, поскольку при них начинается нарушение структуры материала ВИ в области ЧР;

сдвиг фазовых интервалов числа ЧР с наибольшими интенсивностями в сторону меньших фазовых углов не менее чем на 40—50°.

Естественно, что количественные оценки изменений характеристики ЧР для других видов ВИ будут несколько изменяться, но качественно они будут пригодны для разбраковки ВИ различных типов.

ВЫВОДЫ

Таким образом, в данной работе представлены результаты по разработке комплексного двухканального метода и устройства, позволяющего дистанционно определять рабочее состояние ВИ в условиях их эксплуатации. Установленные диагностические признаки позволяют по определенному набору амплитудно-фазовых характеристик отличать работоспособные ВИ от дефектных, требующих немедленной замены.

На основе анализа измерений были сформулированы три основных диагностических признака, отличающие исправные ВИ от дефектных: повышение числа ЧР и их интенсивности за дискретный фазовый интервал; наличие мощных ЧР, превышающих по интенсивности средние значения за фазовый интервал; сдвиг по фазе интервалов с наибольшими интенсивностью и числом ЧР.

ФГБОУ ВПО «Казанский
государственный энергетический
университет»
ОАО «Сетевая компания»,
Казанские электрические сети

Поступила в редакцию
4 декабря 2015 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ Р 55191—2012. Методы испытаний высоким напряжением. Измерения частичных разрядов. — М., Стандартинформ, 2014.

2. Международный стандарт IEC 60060–1:2010. Методы испытаний высоким напряжением.
 3. Вдовико В.П. Частичные разряды в диагностировании высоковольтного оборудования. — Новосибирск, Наука, 2007. — 156 с.
 4. Pan C., Meng Y., Wu R., Han Z., Qin R., Cheng Y. Simulation of partial discharge sequences using fluid equation. — *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2011, v. 44, p. 255201.
 5. Приказ РАО «ЕЭС России». О повышении надежности опорно-стержневых изоляторов, № 252 от 06.05.2002 г.
 6. Clande K. Online monitoring of bushing on large power transformers. — *Electrical insulation conference. Proceedings. 2005*, p. 54.
 7. Ramires-Nino J., Pascacio A. Acoustic measuring of partial discharge in power transformers. — *Means. Sci. Technol.*, 2009, v. 20, p. 115108.
 8. Максудов Д.В., Федоров Е.М. Методы селекции сигналов частичных разрядов в изоляции силовых трансформаторов. — *Вестник УГАТУ, Уфа*, 2009, т. 12, № 2, с. 138–142.
 9. Завидей В.И., Крупенкин М.В., Вихров М.А., Голубев А.В. Электронно-оптическое оборудование при контроле технического состояния элементов и подстанций при рабочем напряжении. — *Сб. научн. трудов ВЭИ*. — М., 2006, с. 59–63.
 10. Голенищев-Кутузов В.А., Голенищев-Кутузов А.В., Евдокимов А.И., Черномашенцев А.Ю. Способ бесконтактной дистанционной диагностики состояния высокополимерных изоляторов. — Патент № 2483315 РФ, 26.12.2011.
 11. Голенищев-Кутузов А.В., Сюнюгин И.Е., Марданов Г.Д. Программа записи, обработки и распределения сигналов ЧР по амплитуде и фазе. — Свид-во о государственной регистрации для ЭВМ № 2014612238, 23.12.2013.
-