

Измеритель постоянной времени релаксации объёмного заряда углеводородов

Г.И. Авербух (Санкт-Петербург, Россия)
okb@vibrator.spb.ru

ведущий инженер

А.В. Бурдуков

инженер-схемотехник

Одним из основных условий эксплуатации танкеров, цистерн, транспортирующих газовый конденсат, углеводородное топливо, в частности, при операциях перекачки, является их пожаровзрывобезопасность. Для её обеспечения необходимо правильно рассчитывать скорость передвижения топлива по трубопроводу. Для правильного планирования стратегии перекачки необходимо знание специфических параметров топлива, в частности, постоянной времени диэлектрической релаксации объёмного заряда. О приборе, предназначенном для измерения данных параметров, а также схемотехнических решениях, использованных в ходе его создания, пойдёт речь в данной статье.

Материалы и методы

Опытный экземпляр прибора Ф1849, эквиваленты измерительной ячейки прибора, образцы углеводородных жидкостей.

Ключевые слова

электростатические измерения, прибор, диэлектрическая релаксация, пожаровзрывобезопасность, топливо

Dielectric relaxation constant measurements of volume charge in hydrocarbons

Authors

Gersh I. Averbukh (Saint-Petersburg, Russia)

lead engineer

Alexander V. Burdukov

circuit design engineer

Как известно, углеводородное топливо является хорошим изолятором, т.е. обладает большим объёмным сопротивлением $10^{10...13}$ Ом, которое приводит к созданию электростатического заряда при трении топлива о стенки трубопровода. Причем с увеличением скорости заливки углеводородного топлива возрастает потенциал заряда внутри резервуара. Образование статического заряда приводит к созданию взрывоопасных условий в среде резервуара, насыщенного парами углеводородов. Чем больше постоянная времени релаксации объёмного заряда углеводорода, тем меньше должна быть скорость перекачки и тем больше требуется времени для заполнения резервуара. Знание постоянной времени τ позволяет определить максимальную скорость закачки, при которой обеспечивается взрывобезопасность. Для нейтрализации заряда применяют различные способы: внутри трубопровода устанавливают нейтрализаторы объёмного заряда, представляющие собой штыри внутри трубопровода, уменьшают скорость заливки топлива заполнения ёмкости танка, цистерны, вводят специальные добавки в топливо, снижающие его удельное сопротивление. [2, 3, 4] Всё это увеличивает время простоя судна и удорожает топливо.

В ЦНИИ СЭТ (г.Санкт-Петербург) был предложен способ наполнения танка судна топливом с переменной скоростью. Пока танк пустой скорость наполнения небольшая, по мере наполнения скорость возрастает. Но для определения начальной скорости наполнения необходимо заранее определить величину удельного сопротивления топлива или величину τ — постоянная времени релаксации (разряда) объёмного заряда топлива, равную произведению R_t и C_v , где R_t — сопротивление топлива, C_v — величина ёмкости ячейки, которая заполнена топливом. Нахождение этих величин возможно только специализированными приборами. Затем по таблицам определяется безопасное значение начальной скорости прокачки топлива. (0.2)

Одним из таких приборов, входящих в состав комплекса аппаратуры по обеспечению безопасности, является измеритель постоянной времени τ релаксации объёмного заряда углеводородного топлива (в дальнейшем измеритель постоянной времени релаксации).

В книге автора В.Л. Галка [3] описывается один из возможных вариантов реализации на практике подобного измерителя постоянной времени релаксации. В нём в качестве усилителя использовался интегратор тока с большим коэффициентом усиления $10^{6...8}$ и цилиндрическая ячейка с плоскими электродами. Ячейка изготавливалась из изоляционного материала с нанесением на вертикальные внешние стенки

полупроводящего слоя, а на плоские электроды — изоляционного слоя. Определение τ производилось по следующему алгоритму — на электроды ячейки подавалось напряжение с опорного источника с помощью контактов реле, ёмкость ячейки с залитым испытуемым углеводородом заряжалась. Затем контакты реле размыкались, и происходил свободный разряд ёмкости ячейки на ёмкость интегратора. Измерялось время заряда током ёмкости ячейки ёмкости интегратора, ток заряда усиленный схемой интегратора поступал на индикаторный стрелочный прибор, где и фиксировалась постоянная времени релаксации объёмного заряда.

Ячейка с плоскими электродами обладает собственной полезной ёмкостью $C_{я}$ относительно корпуса порядка 5пФ. Паразитная ёмкость монтажа относительно корпуса составляет 17 пФ и складывается с ёмкостью ячейки. Кроме того, присутствует входная ёмкость интегратора равная 20...40рФ, которая подключается параллельно и также складывается с ёмкостью ячейки. При заполнении ячейки топливом собственная ёмкость ячейки увеличивается в $\epsilon_r = 2...2,5$ раза ($C_t = \epsilon_r * C_{я}$, где $\epsilon_r = \epsilon_0 * \epsilon_r$) и составляет 10...12,5 пФ, но тем не менее она остаётся существенно меньше суммарной ёмкости — паразитной монтажа и входной интегратора. В результате постоянная времени разряда объёмного заряда определялась, как $\tau_p = R(C_t + C_{пар} + C_{вход})$, которое значительно больше времени разряда собственной ёмкости ячейки с топливом $\tau_t = RC_t$, где C_t — электроёмкость ячейки с топливом, $C_{пар}$ — паразитная ёмкость монтажа, $C_{входа}$ — входная ёмкость усилителя интегратора.

В рассматриваемом варианте ячейки с плоскими электродами электрическая ёмкость всего 5пФ, так как объём полости между электродами должен быть небольшим и составляет, как правило, 450...500 мл. Это необходимо для обеспечения требований искровзрывобезопасности устройства. Увеличение объёма ячейки приводит к увеличению объёма углеводорода и к увеличению его испарения, что при подаче напряжения на электроды ячейки может понизить безопасность прибора.

Кроме того, полезный сигнал зашумлён помехами, наводимыми на измерительную ячейку от электропроводки и прочих источников, на фоне которых при токах 360...400 фА довольно сложно выделить полезный сигнал.

Вывод — измерять постоянную времени релаксации объёмного заряда прямым методом при использовании ячейки с плоскими электродами невозможно, так как ёмкость ячейки мала, и при этом погрешность измерения слишком велика.

Необходима ячейка с большой собственной ёмкостью, значительно превосходящей

ёмкость монтажа и входную ёмкость усилителя $C_T > (C_{\text{пар}} + C_{\text{вход}})$.

В Санкт-Петербурге на «Приборостроительном заводе «Вибратор» совместно с ЦНИИ СЭТ был создан прибор для определения постоянной времени релаксации τ , объёмного заряда жидких углеводородов (прибор Ф1849) с ячейкой, в которой электрическая ёмкость больше ёмкости ячейки с плоскими электродами, а ёмкость объёма составляет 260 мл и измерялся не заряд с помощью интегратора, а напряжение разряда электроёмкости ячейки. В качестве усилителя использовался инструментальный усилитель на м/с INA116 с большим входным сопротивлением 10^{15} Ом и входной ёмкостью 5 пФ, который усиливал ток в режиме повторителя. Измерение напряжения релаксации привело к упрощению схемы усилителя, что в свою очередь привело к значительному уменьшению паразитной монтажной ёмкости.

Прибор состоит из измерительной ячейки, инструментального усилителя, вторично прибора и источника питания от сети 220 В 50 Гц. На рисунке 1 показан описываемый измеритель в сборе. На рисунке 2 показана ячейка в разрезе.

Как видно из рисунка 2, верхняя часть ячейки изготавливается в виде половины шара, электроёмкость ячейки при этом увеличивается и становится больше, чем в ячейке, изготовленной в виде цилиндра. Поверхность внутреннего электрода подобна внутренней поверхности внешнего электрода, в результате электростатическое поле внутри полости ячейки как цилиндрической, так и шаровой, равномерное без искажений. Это позволяет получать более точное измерение разрядного напряжения, чем в ячейки с плоскими электродами. Суммарный объём ячейки цилиндрической и шаровой составляет 260 мл, что меньше объёма ячейки с плоскими электродами. Внешний электрод соединяется с «землёй» прибора, что исключает возможность паразитных наводок на центральный электрод. С центрального электрода снимается полезный сигнал. В полость между электродами заливается исследуемое углеводородное топливо. Собственная ёмкость ячейки $C_{\text{я}}$ в такой конструкции увеличивается до 14...15 пФ.

Величина ёмкости ячейки состоит из $C_{\text{я}} = C_{\text{ш}} + C_{\text{ц}}$,

$$C_{\text{ш}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot R_1 \cdot R_2}{R_2 - R_1} \quad (1)$$

$$C_{\text{ц}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot h}{\ln \left(\frac{R_2}{R_1} \right)}$$

где $C_{\text{ш}}$ — ёмкость шаровой части ячейки,
 $C_{\text{ц}}$ — ёмкость цилиндрической части,
 R_1 — наименьший радиус внутренней полости ячейки,
 R_2 — наибольший радиус внутренней полости ячейки,
 ϵ_r — 1,5...2,5 — относительная диэлектрическая постоянная топлива,
 ϵ_0 — $8,85 \cdot 10^{-12}$ диэлектрическая проницаемость вакуума,
 ϵ — диэлектрическая постоянная топлива.

Рассмотрим работу и особенности ячейки и усилителя. На рисунке 3 приведена функциональная схема усилителя сигнала, использованного в приборе.

В процессе разряда участвует не только проводимость топлива в объёме ячейки, но и сопротивление утечки цепей слаботоочного сигнала относительно «земли». Для уменьшения шунтирующего влияния входного сопротивления усилителя была использована специализированная микросхема инструментального усилителя напряжения с большим входным сопротивлением — 10^{15} Ом и включена в режиме повторителя напряжения, что обеспечивает максимальную линейность. Для дальнейшего снижения влияния сопротивления утечки печатной платы и инструментального усилителя в схему введён компенсатор утечек. Компенсатор устанавливается в цепь обратной связи и подключается к средней точке соединения двух нормально разомкнутых контактов реле, которые подключают/отключают опорный источник питания к ячейки и входу инструментального усилителя. На контакты реле подаётся напряжение с компенсатора с коэффициентом усиления 0,9...1,5, повторяющее напряжение с выхода усилителя.

Также, несмотря на достигнутое увеличение собственной ёмкости ячейки, её значение остаётся сравнимым с паразитной ёмкостью монтажа и элементов схемы усилителя. Для исключения влияния паразитных ёмкостей использован алгоритм с введением дополнительных ёмкостей в измерительную цепь и вычислением истинной постоянной времени косвенным методом.

В качестве дополнительных конденсаторов выступают C_1 и C_2 , которые поочередно коммутируются контактами реле, причём C_2 больше C_1 .

В этом случае постоянная времени релаксации объёмного заряда углеводородов в ячейки с топливом и использованием дополнительных конденсаторов определяется по формуле:

$$\tau_T = \frac{\tau_2 C_1 - \tau_1 C_2}{C_2 - C_1} \quad (2)$$

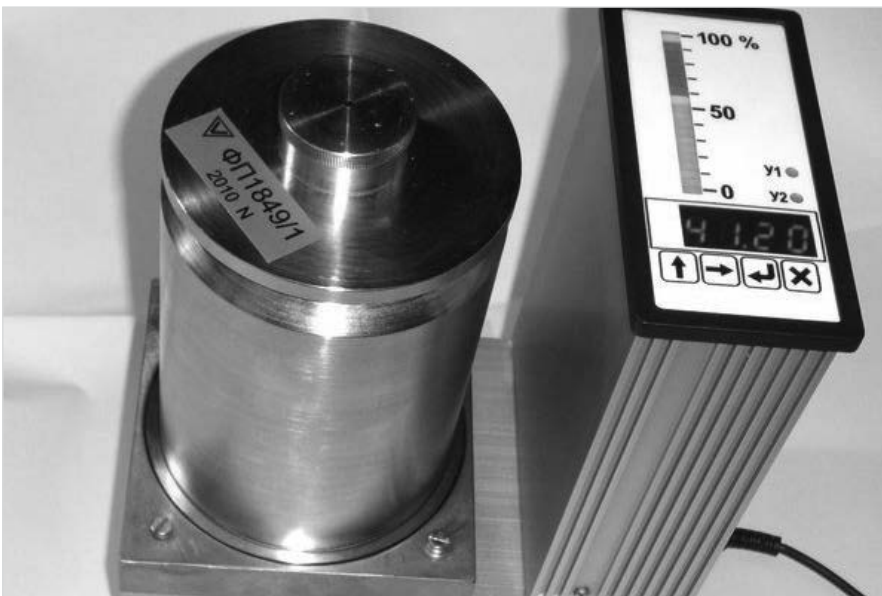


Рис. 1 — Измеритель постоянной времени релаксации

Abstract

One of the most important requirements for transferring operations on tankers, which transporting gas condensate, hydrocarbon fuels, is the fire and explosion safety. For meeting these requirements it is necessary to calculate correct speed of fuel movement through the pipeline. For proper planning of fuel transferring strategies knowledge of specific fuel parameters is needed, in particular, the dielectric relaxation constant of volume charge. The special device, designed to measure these parameters, as well as circuit design used in this device, will be discussed in this article.

Materials and methods

A prototype of the F1849 meter, the measuring cell unit equivalents, samples of hydrocarbon liquids.

Results

As shown by the tests, good repeatability of measurement results is taking place, and accuracy of the instrument is not worse than 4%, which meets the requirements of the measured value maximum relative error.

Conclusions

Suitability of the proposed method was confirmed in practice.

Keywords

electrostatic measurement, dielectric relaxation, fire and explosion safety, fuel

References

1. Analysis of the explosion causes during the loading of tank trucks. http://prompribor.ru/stat_vzrivi.htm
2. N. Krasikov, O. Shuvaeva Abnormal relaxation in the liquid under the influence of the electric field, carried out without contact with the potential electrode. GTF letters, 2000, volume 26, no. 11.
3. Galka VL Electrostatic safety Issues of the oil ships., St. Petersburg.: "Elmor", 2003
4. Terms of protection against static electricity in chemical, petrochemical and refining industries.: «Chemistry», 1973

Эквивалент	Расчетное время, (сек)	Измеренное время, (сек)	Относительная погрешность, (%)
Ф1849. – 1	0,120	0,12	2,56
Ф1849. – 2	1,4	1,422	1,57
Ф1849. – 3	10,92	10,750	1,56
Ф1849. – 4	21,400	21,400	1,9
Ф1849. – 5	27,2	26,16	3,82
Ф1849. – 6	32,1	32,05	3,17

Таб. 1 — Результаты определения основной погрешности прибора с помощью эквивалентов

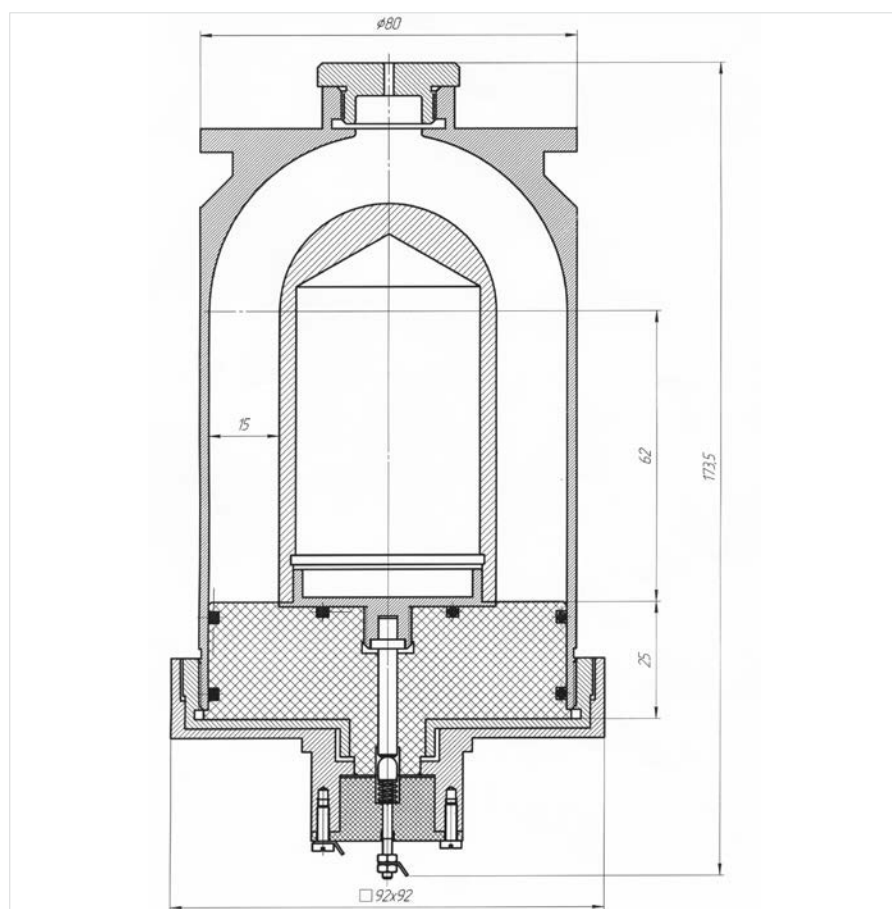


Рис. 2 — Измерительная ячейка в разрезе

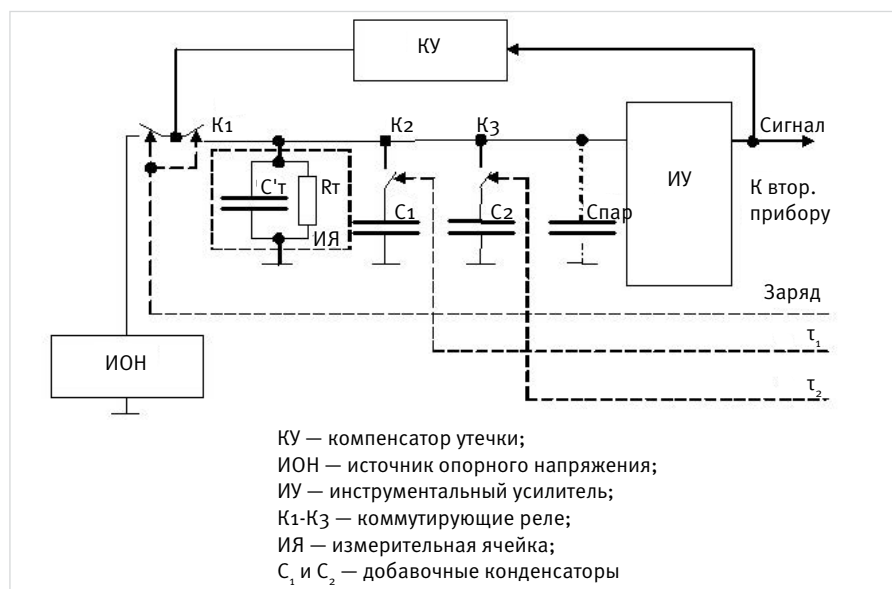


Рис. 3 — Функциональная схема преобразователя

Как видно, в полученную формулу не входит паразитная ёмкость Спар, таким образом, достигается исключение дополнительной погрешности, вызываемое её наличием в схеме усилителя.

Усилитель помещён в отдельный металлический корпус для уменьшения влияния паразитных наводок на схему. Полная функциональная схема прибора показана на рисунке 4. Подробная функциональная схема вторичного прибора приведена на рисунке 5.

Измерительная ячейка содержит исследуемый объём углеводородного топлива, на который воздействует постоянное напряжение от стабильного опорного источника (ИОН).

Инструментальный усилитель выполняет функции повторителя напряжения, которое поступает с центрального электрода ячейки. Усиленный сигнал передаётся на вход вторичного прибора. Вторичный прибор управляет процессом заряда-разряда ячейки, коммутируя реле в блоке усилителя, преобразует напряжение на ёмкости ячейки в цифровые отсчёты, отфильтровывает помехи, затем обрабатывает полученные отсчёты с помощью микроконтроллера и выводит результаты обработки на цифровые и дискретно-аналоговые светодиодные индикаторы. Источник питания служит для питания прибора низковольтным напряжением. Для обеспечения требований безопасности при работе с топливом источник питания выполнен в виде отдельного модуля, вынесенного за пределы корпуса прибора.

Одним из основных элементов прибора является ячейка. Как было указано ранее, сопротивление её элементов изоляции должно быть значительным (много больше 10^{13} Ом), чтобы не шунтировать сопротивление топлива и, кроме того, ёмкость ячейки с топливом должна превышать паразитную ёмкость монтажа усилителя.

Схема измерения работает по алгоритму, определяемому формулой (2). Очередность включения реле усилителя, алгоритм вычисления времени разряда и работа всего прибора в целом определена программой управления, которая занесена в память микроконтроллера вторичного прибора.

Вначале подключается ИОН с помощью контактов реле К1, а также конденсатор С₁ с помощью контактов К2. Ёмкости С₁ и С₂ заряжаются. Затем ИОН отключаются контактами реле К1, и происходит свободный разряд ёмкости ячейки С₁ и добавочного конденсатора С₁ на сопротивление R_т. Интервал времени τ₁ записывается в оперативную память микропроцессора. Затем подключается конденсатор С₂ при помощи К3, и процесс заряда и разряда повторяется, но уже с суммой ёмкостей С₁, С₁ и С₂. Интервал времени τ₂ также записывается в оперативную память микропроцессора, а затем вычисляется время релаксации ττ в соответствии с формулой (2). Конечный результат выводится на цифровые индикаторы.

Уменьшения влияния паразитных сопротивлений утечек на измеряемый сигнал во входной цепи достигается введением компенсатора утечки КУ, который выравнивает

разность потенциалов между контактами реле К1 и окружающими цепями. Для этого на коммутирующие контакты реле К1 через большое сопротивление подаётся напряжение, равное текущему потенциалу ячейки.

Работа прибора вторичного заключается в следующем. С инструментального усилителя сигнал поступает на вход АЦП, который выполняет циклическое измерение и преобразование его выходного сигнала в цифровую форму. С выхода АЦП преобразованный сигнал поступает на вход микроконтроллера МК, содержащего программу управления, в соответствии с которой автоматически обеспечивает коммутацию реле заряда/разряда ячейки и реле, подключающие C_1 и C_2 параллельно ёмкости ячейки C_T в соответствии с уровнем напряжения, измеренным АЦП. Микроконтроллер производит измерение напряжения заряда ячейки, измеряет длительность временных интервалов и выдаёт пересчитанные значения измеряемых величин и другую информацию на УИИ — устройство управления индикацией.

УИИ отображает результаты измерений, пункты меню, текущий режим работы и уровень заряда ячейки при помощи цифрового, светового и дискретно-аналогового индикаторов ИЦ, ИС и ИДА.

КУ кнопки управления предназначены для работы в ручном режиме. С помощью кнопок осуществляется вход в меню, переход по пунктам меню, изменение редактиру-

емого параметра, выход из режима редактирования с сохранением (без сохранения) результата, запуск цикла измерения, прерывание запущенного цикла измерения и сброс результатов измерения.

Энергонезависимая память ЭП хранит управляющую программу микроконтроллера, значения настроек прибора, калибровочные константы и содержимое ячеек памяти пользователя.

Основные технические характеристики измерителя времени релаксации объёмного заряда:

- Диапазон измерений — от 0,1 до 35 сек.
- Время установления рабочего режима не более 15 мин.
- Относительная погрешность измеряемой величины $\pm 15\%$
- Величина электрического сопротивления изоляции между корпусом и цепью питания прибора не менее 20 МОм, между измерительной цепью и корпусом $> 10^{13}$ Ом, при нормальных условиях применения.
- Питание прибора осуществляется от сети напряжением (220 ± 22) В и частотой (50 ± 3) Гц переменного тока.
- Мощность, потребляемая прибором не более 6 В*А.
- Габаритные размеры прибора не более 160×190×95 мм
- Масса прибора с комплектом эквивалентов не более 8,4 кг.

Для проверки калибровки прибора были разработаны 6 эквивалентов, состоящие из высокоомных сопротивлений, соединённых параллельно. Эквиваленты устанавливались совместно с ячейкой, и штатным образом производилось измерение постоянной времени.

В таблице 1 показаны результаты проверки прибора с помощью этих эквивалентов. Все измерения проведены по 3 раза, и из полученных результатов были выбраны максимальные значения погрешностей.

Как видно из таблицы наблюдается достаточная повторяемость результатов измерений, и погрешность прибора не превышает 4%, что удовлетворяет требованиям, установленным для максимальной относительной погрешности измеряемой величины. Таким образом, была подтверждена пригодность предложенного метода и прибора для использования на практике.

Итоги

Как показали проведённые испытания, наблюдается достаточная повторяемость результатов измерений, и погрешность прибора не превышает 4%, что удовлетворяет требованиям, установленным для максимальной относительной погрешности измеряемой величины.

Выводы

Была подтверждена пригодность предложенного метода и прибора для использования на практике.

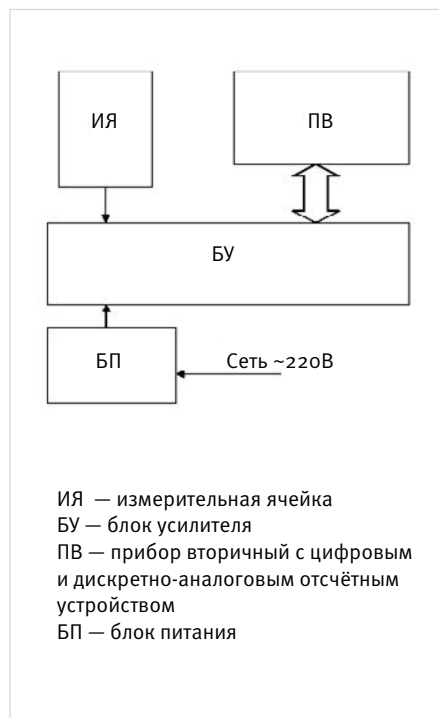


Рис. 4 — Функциональная схема прибора для измерения постоянной времени релаксации (Ф1849)

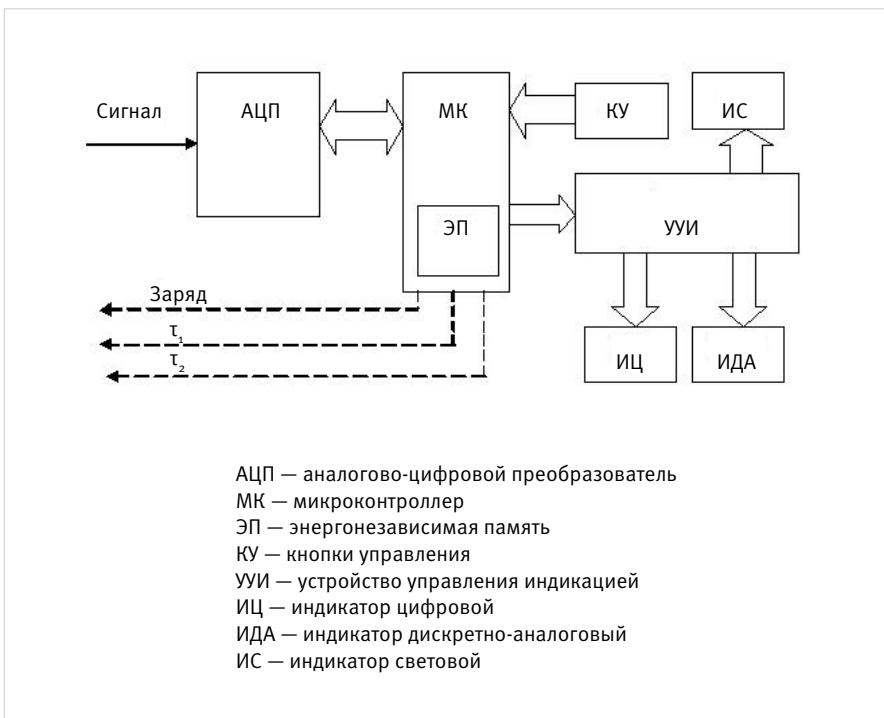


Рис. 5 — Функциональная схема прибора вторичного

Список использованной литературы

1. Анализ причин взрывов автоцистерн при наливке.
http://prompribor.ru/stat_vzrivi.htm
2. Н.Н. Красиков, О.В. Шуваева
Аномальная релаксация в жидкости при действии электрического поля, осуществляемого без контакта с потенциалозадающим электродом. Письма в ЖТФ, 2000, том 26, вып. 11.
3. Галка В.Л. Вопросы электростатической искробезопасности наливаемых судов. -СПб.:издат.Элмор, 2003 г.
4. Правила защиты от статического электричества в производствах химической, нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности.: издат. «Химия», 1973г