

materials heat treatment // Life Science Journal. 2014. V. 11. No. 8. P. 512–515.

15. **Лаврентьев В. А., Калганова С. Г.** Применение энергии СВЧ электромагнитных колебаний для воздействия на процесс отверждения эпоксидных смол. // Электро- и теплотехнологические процессы и установки: Сб. научных трудов. Саратов: СГТУ, 2005. Т.2. С.67–70.

16. **Лаврентьев В. А., Калганова С. Г.** Влияние режимов СВЧ – отверждения на прочностные свойства эпоксидного компаунда. // Проблемы электроэнергетики: Сб. научных трудов. Саратов: СГТУ, 2008. С. 133–136.

17. **Navabpour P., Nesbit A., Degamber B., Fernando G., Vann T., Day R.** Comparison of the curing kinetics of a DGEBA/acid anhydride epoxy resin system using differential

scanning calorimetry and a microwave-heated calorimeter // Journal of Applied Polymer Science. 2007. No. 104(3). P. 2054–2063.

18. **Гузева Т. А.** Совершенствование технологических режимов отверждения заготовок деталей из органоластиков под действием СВЧ излучения // Автореф. дис. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Москва, 2014.

19. **Пат. 2060600 РФ.** СВЧ-печь конвейерного типа (варианты) / В.Н. Нефёдов, Г. Г. Валеев, С. В. Корнеев, Ю. В. Карпенко // Изобретения. 1996. № 5.

20. **Фрадин А. З.** Антенно-фидерные устройства. М.: Связь, 1977.

Дата принятия: 16.11.2017.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

621.3.082

Прибор для технологического контроля погонной ёмкости электрического провода

Г. В. ВАВИЛОВА, А. Е. ГОЛЬДШТЕЙН

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Томск, Россия, e-mail: wgw@tpu.ru

Приведены теоретическое описание и практическая реализация метода технологического контроля ёмкости одножильного провода. Представлены нормативные документы, регламентирующие измерение ёмкости провода, отмечена ограниченность их применения для технологического контроля. Разработаны минимизирующие погрешность измерения методики первичной и рабочей настроек измерителя ёмкости. Рассмотрена проблема определения действительного значения ёмкости образцов провода. Описаны конструкция, принцип действия и результаты заводских испытаний измерителя ёмкости CAP-10.

Ключевые слова: одножильный провод, погонная ёмкость, электропроводность воды, диэлектрическая проницаемость, действительное значение ёмкости, настройка.

The theoretical description and practical realization of a method for in-process control of the capacitance per length unit of an single-core electric wire are presented. The normative documents regulating measurement of the electric wire capacitance are considered. The limitations of these documents for in-process control of the electric wire quality are stated. The techniques of initial and operating adjustment of the device for measuring the capacitance per length unit have been elaborated to minimize the measurement error. The problem of determining the actual value of the wire sample capacitance is considered. The operating principle and design of the device CAP-10 are described. The results of its in-plant testing are provided.

Key words: single-core wire, capacitance per length unit, water conductivity, permittivity, actual capacitance value, adjustment.

Для ряда кабельных изделий (кабели связи, телефонные провода и др.) ёмкость является важным параметром, определяющим качество передачи информации. К другим нормирующим характеристикам кабельных изделий относятся геометрические параметры (диаметры жилы и изоляции, толщина изоляции, эксцентricность и т. д.) и связанные с

ними электрические параметры (активное сопротивление, погонная ёмкость, волновое сопротивление и т. д.) [1, 2]. Таким образом, результат измерения ёмкости может быть использован для контроля геометрических параметров кабельных изделий.

Контроль ёмкости провода важен при изготовлении ка-

бельных изделий, причем не только для готового изделия, но и непосредственно в процессе производства для обеспечения сплошного контроля ёмкости провода по всей длине изделия [3] и своевременных корректировок технологического процесса при отклонении ёмкости от номинального значения. Ёмкость зависит от процесса нанесения изоляции на жилу провода, поэтому контроль следует проводить на этапе экструзии.

Наиболее подходящим методом технологического контроля ёмкости провода является использование трубчатого электрода, погружённого в охлаждающую ванну с водой, внутри которого непрерывно движется контролируемый провод [4, 5]. В этом случае преобразователь можно рассматривать как цилиндрический конденсатор: одна обкладка – жила провода, другая – вода, создающая электрический контакт между изоляцией провода и внутренней поверхностью трубчатого электрода. Метод заключается в измерении силы тока, по значению которой при известных амплитуде и частоте приложенного напряжения определяется ёмкость провода. Описанный метод практически не имеет альтернативы и широко применяется передовыми в области кабельного приборостроения фирмами Sikora (Германия), Zumbach (Швейцария), Proton Products (Великобритания). Приборы этих фирм имеют высокую стоимость, при этом не учитываются специфика эксплуатации в условиях российских кабельных заводов. Для устранения указанных недостатков авторами настоящей статьи разработан электроёмкостный измерительный преобразователь (ЭЕИП), предназначенный для технологического контроля ёмкости провода.

Конструкция измерительного преобразователя. К основным элементам конструкции разработанного ЭЕИП (схема приведена в [6]) относятся измерительный и дополнительные электроды, обеспечивающие однородное электрическое поле в зоне измерения. Электроды размещены внутри металлического корпуса и изолированы от него воздушным слоем. Гармоническое напряжение $U_m \sin \omega t$ известной амплитуды и частоты генератора подаётся на электроды преобразователя. Контролируемый провод непрерывно движется внутри ЭЕИП.

На этапе проектирования преобразователя методом численного моделирования взаимодействия электрического поля ЭЕИП с контролируемым проводом подобраны оптимальные конструктивные параметры преобразователя: внутренние радиусы трубчатых электродов R_3 и корпуса преобразователя R_k , длины измерительного L_3 и дополнительных L_d электродов, расстояние d между измерительным и дополнительными электродами.

Для обеспечения независимости функции преобразования ЭЕИП от геометрических размеров провода, электрических свойств его изоляции и изменения электропроводности воды требуется реализовать высокую однородность электрического поля внутри измерительного электрода. Однородным является поле, для которого при любом фиксированном значении радиуса R_3 внутри измерительного электрода значения радиальной составляющей E_r вектора напряжённости электрического поля $\mathbf{E}$ будут одинаковыми

и соблюдается равенство нулю продольной составляющей E_x (направленной вдоль оси жилы провода). Однородность поля оценивалась по значению параметра β , равного отношению погонной ёмкости между электродом и жилой провода на участке в центральной части измерительного электрода (где поле заведомо однородно в продольном направлении) к погонной ёмкости по всей длине этого электрода. При оптимальной конструкции преобразователя $\beta=1$.

Компьютерным моделированием установлены оптимальные конструктивные параметры ЭЕИП: $L_3 = (200 \dots 300)$ мм; $R_3 \geq 2r$ (r – наружный радиус изоляции провода); $R_k \geq 2R_3$; минимальное значение $L_d = (0,5 \dots 1)R_3$; $d = (1 \dots 3)$ мм [7].

Алгоритм преобразования выходного сигнала ЭЕИП в ёмкость контролируемого провода. Преобразование силы тока измерительного электрода ЭЕИП в ёмкость провода можно описать линейной функцией вида

$$C = C_0 + kI_x,$$

где I_x – сила тока в цепи измерительного электрода; C_0 , k – соответственно постоянная составляющая и коэффициент пропорциональности, значения которых зависят от конструктивных параметров конкретного ЭЕИП.

Основным мешающим фактором при измерении погонной ёмкости провода является существенная зависимость параметров C_0 , k от электропроводности воды в охлаждающей ванне, в которую погружён измерительный преобразователь [6]:

$$C = C_0(\lambda) + k(\lambda)I_x. \quad (1)$$

Подбор коэффициентов C_0 , k осуществляется при первичной настройке измерителя ёмкости еще на этапе его изготовления. При первичной и рабочей настройках и калибровке готового прибора используются образцы проводов с известными действительными значениями ёмкости.

Определение действительных значений ёмкости образцов провода. Стандартом [2] регламентируется определение действительного значения ёмкости провода, используемого для настроек и калибровки прибора, в нормальных климатических условиях (при температуре воздуха 15–35 °С). При этом в данном стандарте отсутствуют требования к качеству воды. Однако согласно результатам проведённых исследований [6, 7] и научно-технической информации [8, 9] изменения температуры и состава воды (наличие примесей) вызывают значительное изменение удельной электропроводности воды, которое может обусловить погрешность измерения ёмкости до 20 %. Условия технологического процесса производства провода могут значительно отличаться от нормальных условий: температура воды в охлаждающей ванне может варьироваться от 15 до 90 °С в зависимости от материала изоляции провода [10, 11]. Таким образом, возникла необходимость дополнительного экспериментального изучения изменений ёмкости провода при различных условиях проведения измерений.

Для исследования использовались отрезки одножильных электрических проводов с изоляцией из полимеров различных

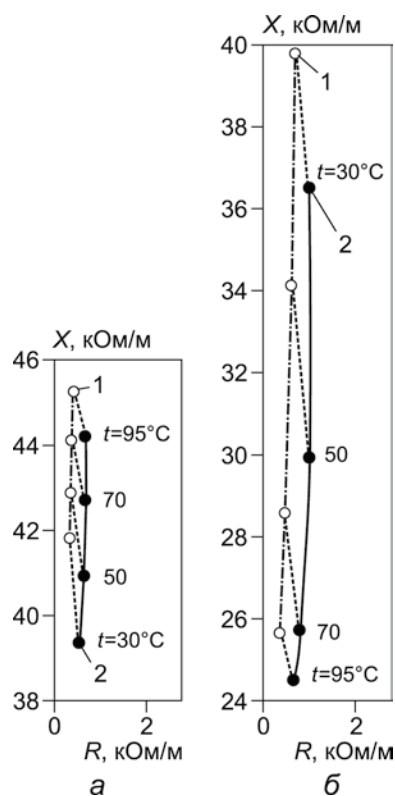


Рис. 1. Годографы изменения комплексного сопротивления полиэтиленовой (а) и поливинилхлоридной (б) изоляций провода от изменения температуры пресной (1) и солёной (2) водопроводной воды

до 95 °С. Во второй части в воду добавлялась поваренная соль NaCl концентрацией $\lambda = 4$ г/л и изменялась температура воды в том же диапазоне. Соль NaCl выбрана из соображений её распространённости, доступности, безвредности и простоты утилизации [9].

марок. Образцы провода погружались в металлический бак, заполненный обычной водопроводной водой (концентрация примесей $\lambda < 1$ г/л [12]). Эксперимент проводился при температуре воздуха (25 ± 2) °С. Ёмкость провода измерялась RLC-метром с погрешностью измерения 0,05 %, что обеспечивало требуемую точность измерения [2] в соответствии с эквивалентной последовательной схемой замещения. Измеренное значение ёмкости приводилось к единице длины провода для получения погонной ёмкости.

В первой части эксперимента электропроводность воды изменялась за счёт изменения её температуры от 25

На рис. 1 показаны годографы изменения погонного комплексного сопротивления $\tilde{Z} = R - jX$ изоляции провода при изменении температуры пресной $\lambda < 1$ г/л (1) и солёной $\lambda = 4$ г/л (2) водопроводной воды для образцов провода с изоляцией из полиэтилена и поливинилхлорида; пунктирные линии обозначают годографы при изменении солёности воды.

Анализ полученных данных показал, что при повышении температуры воды от 25 до 95 °С в основном изменяется реактивная составляющая комплексного сопротивления, имеющая ёмкостный характер. Для образца провода с изоляцией из поливинилхлорида наблюдалось значительное изменение погонного комплексного сопротивления изоляции провода, причём изменение температуры оказывало более значительное влияние (уменьшение примерно на 35 %) на результат измерения, чем изменение концентрации соли (увеличение на 4,5–10 %). Для проводов с изоляцией из полиэтилена изменения концентрации соли и температуры воды незначительно влияют на погонное комплексное сопротивление изоляции (увеличение около 5 %). Таким образом, установлено, что основной вклад в изменение ёмкости провода вносят изменения свойств изоляции провода при изменении температуры. Более наглядно зависимость $C(t)$ представлена на рис. 2. Повышение температуры воды приводит к незначительному (на 4 %) уменьшению ёмкости образцов с изоляцией из полиэтилена и существенному увеличению (на 56 %) ёмкости проводов с изоляцией из поливинилхлорида. Увеличение концентрации соли в воде (от 0 до 4 г/л) приводит к изменению измеренной ёмкости проводов с различной изоляцией примерно на 5 %.

Проведённые исследования показали, что ёмкость провода определяется условиями эксперимента, причём в меньшей степени она зависит от удельной электропроводности воды (концентрации примесей и температуры) и в большей степени – от температуры изоляции из разных полимерных материалов. Поэтому при первичной и рабочей настройках, а также калибровке измерителя ёмкости в качестве действительных значений ёмкости образцов провода необходимо использовать результаты измерения, полученные в условиях, соответствующих условиям проведения настроек и калибровок. Влияние условий на результат измерений ёмкости не учитывается в стандарте [2], что указывает на ограниченность его применения для технологического контроля ёмкости провода. Частично указанные недостатки устраняются применением зарубежного стандарта [13], в котором предлагается проводить измерения при различных температурных режимах воды и изоляции провода, а в качестве действительного значения ёмкости использовать усреднённый результат измерений.

Таким образом, для метрологического обеспечения технологического контроля ёмкости провода требуется разработка соответствующих нормативных документов, позволяющих учитывать конкретные условия технологического процесса при проведении измерений на кабельной линии.

Отстройка от влияния изменения электропроводности провода. Отстройка от влияния – это подавление воздействия изменения мешающего параметра на результаты контроля [14]. На

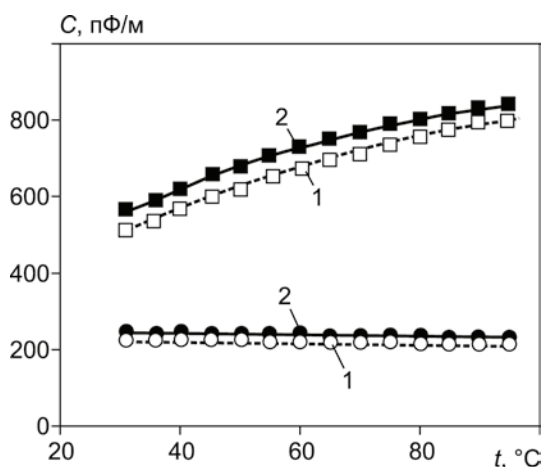


Рис. 2. Зависимость погонной ёмкости провода от температуры пресной (1) и солёной (2) водопроводной воды для полиэтиленовой (кружки) и поливинилхлоридной (квадраты) изоляций

этапе изготовления измерителя ёмкости проводится первичная настройка, которая заключается в определении коэффициентов $C_0(\lambda)$ и $k(\lambda)$ функции преобразования (1), что обеспечивает отстройку от влияния изменения электропроводности воды. Авторами настоящей статьи предложены два метода отстройки, основанные на косвенном измерении удельной электропроводности воды.

Первый метод основан на определении фазы φ тока I_x измерительного электрода, которую находят из соотношения $t = \operatorname{tg}(\varphi) = \operatorname{Re} \dot{I}_x / \operatorname{Im} \dot{I}_x$, и внесении поправок в функцию преобразования ЭИП (1). Этот метод позволяет уменьшить погрешность измерения ёмкости в условиях значительного изменения электропроводности воды до 2,5 % без проведения дополнительных настроек. Но данный метод нежелательно применять, если в процессе контроля изменение фазы тока происходит с изменением не только электропроводности, но и соотношения электрических параметров изоляции провода C_x , R_x . Кроме того, в этом случае невозможен отдельный контроль данных параметров, что ограничивает информативность контроля [6].

Второй метод отстройки базируется на информации об электропроводности воды, найденной по силе тока генератора I_1 , нагрузкой которого являются все электроды ЭИП, и внесении поправок в функцию преобразования (1) [6].

Отстройка от влияния мешающих факторов заключается в замене коэффициентов $C_0(\lambda)$, $k(\lambda)$ в функции преобразования (1) на соответствующие коэффициенты $C_0(t)$, $k(t)$ или $C_0(I_1)$, $k(I_1)$, с достаточной степенью приближения описываемые полиномами второго порядка. Коэффициенты полиномов определяются конструктивными параметрами используемого ЭИП:

$$C = C_0(t) + k(t)I_x \text{ или } C = C_0(I_1) + k(I_1)I_x. \quad (2)$$

В результате эксперимента оценена эффективность использования обоих методов отстройки. При нахождении ёмкости провода в случае изменения электропроводности воды определяется значение для воды нулевой солёности и температуры при нормальных условиях (25 °C), что позволяет уменьшить погрешность измерения до 2,5 % в очень широком диапазоне изменения электропроводности без проведения дополнительных настроек.

Измеритель ёмкости САР-10. Данный измеритель предназначен для технологического контроля погонной ёмкости одножильного электрического провода и обеспечивает её измерение, сравнение измеренного и предельно допустимых значений. Также САР-10 осуществляет индикацию результата измерения, создаёт и хранит массив результатов измерений за заданный промежуток времени. Основные технические характеристики САР-10: диапазон измеряемой погонной ёмкости 50–500 пФ/м; наружный диаметр изоляции провода 0,5–12 мм; максимально допустимая погрешность измерения погонной ёмкости 2,5 % номинального значения в диапазоне изменения электропроводности воды, эквивалентной изменению концентрации соли NaCl в диапазоне 0–4 г/л.

Конструкция САР-10 включает ЭИП, пульт отображения информации и допускового контроля БИ-1, персональный

компьютер. Структурная схема САР-10 представлена в [6]. В данном измерителе реализованы описанные выше функция преобразования (1) и выбранный метод отстройки от влияния изменения электропроводности воды (2). Ёмкость контролируемого провода преобразуется в силу тока I_x . Выходной сигнал ЭИП подаётся на вход блока аналогового преобразования сигнала, состоящего из трансформатора тока, преобразователя ток–напряжение и амплитудно-фазового детектора. Гальваническую развязку измерительной цепи электрода и схемы аналогового преобразования сигнала обеспечивает трансформатор тока. В амплитудно-фазовом детекторе выделяются комплексные составляющие тока цепи измерительного электрода ($\operatorname{Re} \dot{I}_x$, $\operatorname{Im} \dot{I}_x$) и передаются в блок вычислительной обработки сигнала, в котором осуществляется фильтрация, усреднение и окончательная вычислительная обработка сигналов измерительной информации.

Блок визуализации предназначен для представления измерительной информации в удобном для оператора виде. Для этого применяется пульт отображения информации и допускового контроля БИ-1. Персональный компьютер используется для записи массива данных за заданный интервал времени и более подробной визуализации измерительной информации.

Измеритель САР-10 также может осуществлять непрерывный контроль локальных дефектов изоляции провода, таких как прокол, трещина, инородное включение и т. п. При регистрации дефекта наблюдается резкое изменение геометрических размеров и электрических свойств изоляции и, соответственно, ёмкости провода. Это позволяет расширить сферу применения САР-10 и дополнить возможности дефектоскопии с помощью электроискрового метода контроля в кабельной промышленности.

Рабочая настройка САР-10 необходима для исключения аддитивной и мультипликативной составляющих систематической погрешности при установке прибора на технологической линии (впервые или после ремонта). Задача рабочей настройки, проводимой в автоматизированном режиме, состоит в определении значения ёмкости ΔC , на которое необходимо скорректировать результат измерения ёмкости для исключения систематической погрешности [6]. Качество выполненной рабочей настройки проверяется на образцах провода с известным значением ёмкости.

Заводские испытания САР-10. Работоспособность и эффективность применения измерителя ёмкости проверялись в лабораторных и заводских условиях. При испытаниях измерителя подтверждены стабильность и устойчивость его работы, эффективность предложенных методик настройки и калибровки. Результаты измерений ёмкости соответствуют заявленным техническим характеристикам прибора.

Заводские испытания проводили на линии экструзии. Имитировали условия, позволяющие проверить зависимость ёмкости провода от температуры. Для этого специально был выбран провод с поливинилхлоридной изоляцией, имеющей существенную зависимость диэлектрической проницаемости от температуры. С целью увеличения диапазона изменения температуры изоляции провода

SAP-10 размещали в охлаждающей ванне в непосредственной близости от экструдера, где изоляция изготавливаемого провода имеет относительно высокую температуру. Температура пластиката в экструдере составляет 155 °С, температура воды в охлаждающей ванне – 29 °С. Изменение температуры изоляции провода моделировали изменением скорости движения линии от 9 до 22 м/с. Это приводило к повышению температуры изоляции провода в зоне измерения, так как с увеличением скорости движения замедляется охлаждение изоляции провода. Как и ожидалось, повышение скорости движения линии привело к увеличению измеренного значения ёмкости провода. Установили линейную зависимость ёмкости провода от скорости движения линии, что можно объяснить зависимостью ёмкости от диэлектрической проницаемости поливинилхлорида. Подобное изменение ёмкости провода при возрастании скорости движения с 9 до 22 м/с соизмеримо с увеличением температуры воды на 30 °С в статическом режиме (см. рис. 2).

Заключение. Подобраны оптимальные конструктивные параметры ЭЕИП: $L_9 = (200...300)$ мм; $R_9 \geq 2r$ (r – наружный радиус изоляции провода); $R_k \geq 2R_9$; минимальное значение $L_d = (0,5...1)R_9$; $d = 1...3$ мм. Оптимальная конструкция ЭЕИП позволяет минимизировать (снизить практически до нуля) методическую погрешность измерения ёмкости, обусловленную изменением геометрических размеров провода и материала его изоляции. Разработана методика первичной настройки измерителя ёмкости, позволяющая реализовать отстройку от влияния изменения электропроводности воды путём подбора коэффициентов для функции преобразования ЭЕИП. Показано значительное влияние температуры на результат измерения ёмкости вследствие температурной зависимости диэлектрической проницаемости некоторых материалов изоляции, что может приводить к изменению действительного значения ёмкости провода.

Выявлена ограниченность применения для технологического контроля стандарта [2], предназначенного непосредственно для выходного контроля, отмечена необходимость разработки нормативных документов, позволяющих учитывать реальные условия технологического контроля ёмкости.

Показана возможность использования измерителя ёмкости SAP-10 для обнаружения локальных дефектов изоляции провода. Приведены результаты испытаний прибора на технологической линии.

Исследование проводится в Томском политехническом университете в рамках гранта Программы повышения конку-

рентоспособности Томского политехнического университета (ВИУ – ИНК – 76/2017).

Л и т е р а т у р а

1. **ГОСТ 4.143–85.** СПКП. Изделия кабельные. Номенклатура показателей.
2. **ГОСТ 27893–88 (СТ СЭВ 1101–87).** Кабели связи. Методы испытаний.
3. **Лидер Х., Забалуев В. Ю.** Прошлое, настоящее, будущее. Инновации в измерительных технологиях для кабельной промышленности // Кабели и провода. 2015. № 1. С. 21–23.
4. **Пат. 20030128038 US.** Capacitance monitoring systems/ P. Fleming, L. R. Coleman, 2003.
5. **Пат. 6498499 US.** Device for measuring the capacitance of electrical wires/ H. Sikora, 2002.
6. **Goldshtein A. E., Vavilova G. V., Mazikov S. V.** Capacitance Control on the Wire Production Line // MATEC Web of Conferences. 2016. V. 79. P. 01009.
7. **Гольдштейн А. Е., Вавилова Г. В., Белянкин В. Ю.** Электроёмкостный измерительный преобразователь для технологического контроля погонной ёмкости электрического кабеля в процессе производства // Дефектоскопия. 2015. № 2. С. 35–43.
8. **Химический контроль на тепловых и атомных электростанциях:** учебник для вузов / Под ред. О. И. Мартыновой. М.: Энергия, 1980.
9. **МУ 34-70-114–85.** Методические указания по применению кондуктометрического контроля для ведения водного режима электростанций.
10. **Григорьян А. Г., Дикерман Д. Н., Пешков И. Б.** Технология производства кабелей и проводов с применением пластмасс и резин. М.: Машиностроение. 2011.
11. **Кабели и провода.** Основы кабельной техники / Под ред. И. Б. Пешкова. М.: Энергоатомиздат, 2009.
12. **СанПиН 2.1.4.1074–01.** Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. Гигиенические требования к обеспечению безопасности систем горячего водоснабжения.
13. **ANSI/UL 1581–2006.** Reference Standard for Electrical Wires, Cables, and Flexible Cords (UL 1581).
14. **ГОСТ Р 55611–2013.** Контроль неразрушающий вихревой. Термины и определения.

Дата принятия: 13.09.2017.