

УДК 621.3.015.3:537.523.3:697.946

Л. З. БОГУСЛАВСКИЙ, В. В. ДИОРДИЙЧУК

ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЕ ФИЛЬТРЫ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ КАК НАГРУЗКА ИСТОЧНИКОВ КОМБИНИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

Рассмотрены вопросы изменения характера нагрузки систем комбинированного питания электростатических фильтров в процессе улавливания пыли с известными значениями удельного электрического сопротивления при формировании слабопроводящего слоя на поверхности осадительного электрода. Установлена взаимосвязь величины напряжения прикладываемого к газовому промежутку с толщиной слоя осевшей пыли, позволяющая судить о интенсивности коронного разряда в данных условиях и режиме работы источника питания постоянного напряжения. Установлен характер изменения электрической емкости электродной системы в зависимости от толщины слоя осевшей пыли.

Ключевые слова: электростатическая фильтрация, толщина слоя пыли, комбинированное питание, эффект запирания коронного разряда.

Введение. Основной объем выбрасываемых котлами тепловых электростанций в атмосферу газов очищается электростатическими фильтрами (ЭФ). Вопросы повышения их производительности посредством поиска новых способов осуществления электропитания и совершенствования систем управления комплексами электропитания не теряют актуальности уже на протяжении более чем 20 лет. Способ одновременного питания ЭФ постоянным и импульсным напряжением – одно из подобных решений, которое предлагается применять для повышения производительности в случае улавливания «тяжелой» пыли с высоким удельным сопротивлением и характерными размерами порядка 1 мкм. С другой стороны, данный способ характеризуется взаимным влиянием режимов источников импульсного и постоянного напряжения связанных посредством технологической нагрузки. Углубленное изучение процессов протекающих в зоне осаждения пыли позволит определить и связать режимы источников питания.

Анализ предварительных исследований. Обычно для питания ЭФ применяют постоянное напряжение [1, 4]. Известен опыт применения переменного, прерывистого и других типов напряжения для повышения качества фильтрации в случае улавливания высокоомной пыли и агрессивных туманов [5]. В работах [4, 5] показано, что суммирование постоянного напряжения с импульсным может уменьшить запыленность газов на выходе ЭФ и снизить влияние эффекта обратного коронирования осадительного электрода (ОЭ). Для формирования суперпозиции напряжений зачастую используют два источника питания, каждый из которых формирует определенную составляющую напряжения, и нагружаются одной технологической нагрузкой. Процессы, происходящие в нагрузке, определяют и связывают режимы работы источников напряжения. Кроме того, какие-либо изменения режима одного из источников непосредственно через нагрузку влияют на режим второго источника независимо от схемы соединения источников и нагрузки.

Целью работы является определение характера изменения активной и емкостной составляющей технологической нагрузки в пределах диапазона регулирования источников питания для одного технологического

цикла.

Зачастую нагрузкой источников электрической энергии в пластинчатом ЭФ является электродная система (ЭС) «острие – плоскость» с отрицательным потенциалом на острие. Подача высокого напряжения на электроды-острия вызывает зажигание коронного разряда (КР) в разрядном промежутке в объеме очищаемого газа. КР является источником заряженных ионов и электронов, которые оседают на поверхности пылевых частиц, тем самым пылевые частицы приобретают электрический заряд. Под действием сил внешнего электрического поля КР заряженные пылевые частицы начинают двигаться по направлению к заземленному ОЭ, после чего оседают на нем и удерживаются силами адгезии. При нарастании слоя осевшей пыли на ОЭ с некоторой периодичностью происходит встряхивание ОЭ и коронирующего электрода (КЭ) для очистки от осевшей пыли, часть которой после встряхивания попадает в пылесборочный бункер, а часть возвращается в поток очищаемого газа [1,4].

В литературе [10] для чистых электродов ЭФ схема замещения (рис. 1), нагрузка рассматривается как активно-емкостная и учитывает нелинейную форму вольт-амперной характеристики $R_{\text{оэф}}$, токи утечки по поверхностям высоковольтных изоляторов $R_{\text{ут}}$, постоянную электрическую емкость C конструктивных элементов ЭФ, емкость ЭС $C_{\text{оэф}}$ ЭФ.

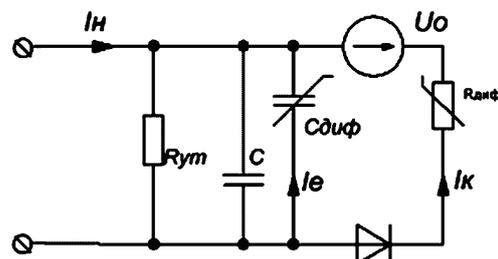


Рисунок 1 – Схема замещения ЭС ЭФ как нагрузки источника питания

Величина напряжения источника ЭДС U_0 эквивалентна напряжению зажигания КР. Диод D соответствует запирающим свойствам КР при напряжениях ниже напряжения зажигания. Поскольку в рамках данной статьи рассматриваются источники с униполярным питанием отрицательного потенциала, то зажига-

ние КР при смене полярности не рассматривается. Также, величинами токов утечки и конструктивной электрической емкости ЭФ по сравнению с током КР и емкостью ЭС можно пренебречь.

Величину линейной плотности постоянного тока КР $I_{КР}$ на единицу длины КЭ, можно определить исходя из выражения Дейча [3] для пластинчатых ЭФ.

$$I_{КР} = 4\pi\epsilon_0 K \cdot H^{-2} \ln^{-1} \frac{d}{r_0} \cdot (U - U_0) \cdot U, \quad (1)$$

где K – коэффициент, характеризующий подвижность ионов, $m^2/V\cdot c$; H – длина разрядного промежутка, м; d – шаг коронирующих элементов, м; r_0 – радиус коронирующего элемента, м; U_0 – напряжение зажигания КР, В.

В промышленных ЭФ площадь КЭ может достигать $S_{КЭ} > 700 m^2$, а осаждающих электродов (ОЭ) еще больше ($S_{ОЭ} \sim 36000 m^2$) [1, 2], тогда при длине промежутка $H < 400$ мм, шаге $d \sim 0,15-0,35$ м и радиусе $r_0 \sim 1$ мм емкость ЭС можно определять по формуле:

$$C_{эс} = \epsilon\epsilon_0 S_{КЭ} H^{-1}. \quad (2)$$

С учетом емкостной составляющей тока КР в ЭФ при его питании импульсно-периодическим напряжением с постоянной составляющей можно использовать выражение [6,7,8]:

$$i_h(t) = A \cdot (u(t) - U_0) \cdot u(t) + C_{эс} \frac{du(t)}{dt}, \quad (3)$$

где $A = 4\pi\epsilon_0 K \cdot H^{-2} \ln^{-1} d/r_0$ – размерный коэффициент характеризующий геометрию электродной системы и свойства газа в разрядном промежутке.

Тем не менее, приведенные выше выражения справедливы для чистых электродов. В процессе работы ЭФ на ЭС оседает пыль, изменяя характеристики технологической нагрузки. Пыль, улавливаемая ЭФ, характеризуется удельным электрическим сопротивлением ($УЭС$) ρ_n в диапазоне от 10^4 до $10^{12} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ и относительной диэлектрической проницаемостью (ОДП) ϵ_n 1,5-20 единиц [4]. Таким образом, при оседании пыли на ЭС изменяются как вольтамперная характеристика ЭС так и ее электрическая емкость.

Если к ЭС ЭФ приложено напряжение выше напряжения зажигания КР и через промежуток протекает ток, то образование слоя пыли приведет к возникновению падения напряжения на слое, тем самым

Приравняем токи $I_{КР}$ и приведем указанную систему уравнений к $U_{np}(h_{сл})$:

$$U_{np}(h_{сл}) = \frac{A\rho_{сл}h_{сл}L_{кэ}U_0 - S_{ОЭ} + \sqrt{(A\rho_{сл}h_{сл}L_{кэ}U_0)^2 + 2A\rho_{сл}h_{сл}L_{кэ}S_{ОЭ}(2U_{эс} - U_0) + S_{ОЭ}^2}}{2A\rho_{сл}h_{сл}L_{кэ}}, \quad (5)$$

где $\rho_{сл}$ – УЭС улавливаемой пыли $\text{Ом} \cdot \text{м}$; $h_{сл}$ – толщина слоя осевшей пыли, м; $L_{кэ}$ – погонная длина КЭ, м.

Равенство (5) позволяет определить напряжение, приложенное к газовому промежутку в зависимости от толщины слоя пыли осевшей на электроде для известных конструктивных параметров ЭФ и УЭС пыли. На рис. 3 приведена зависимость для $U_{np}(h_{сл})$ для технических характеристик ЭФ, указанных в литературном источнике [9].

Из рис. 3 видно, что по мере роста слоя пыли на ОЭ напряжение, приложенное к газовому промежутку U_{np} снижается от напряжения питания ЭФ $U_{эс}$ до на-

сняя напряжение, прикладываемое к газовому промежутку и снижению тока, протекающего через газовый промежуток. Схематически распределение падений напряжения, слой пыли, осевшей на ОЭ, показаны на рис. 2.

Рассмотренную выше взаимосвязь можно описать системой уравнений (4).

$$\begin{cases} U_{эс} = U_{np} + U_{сл}; \\ I_{КР} = \frac{U_{сл} S_{ОЭ}}{\rho_n h_{сл}}; \\ I_{КР} = A(U_{np} - U_0)U_{np} L_{кэ}, \end{cases} \quad (4)$$

где $I_{КР}$ – ток КР, А; ρ_n – удельное электрическое сопротивление пыли, $\text{Ом} \cdot \text{м}$; $L_{кэ}$ – погонная длина КЭ, м; $S_{ОЭ}$ – площадь поверхности ОЭ, m^2 .

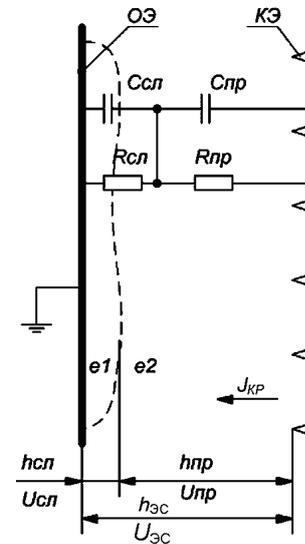


Рисунок 2 – Влияние слоя пыли на характер нагрузки комбинированного источника питания, где $R_{сл}$ – сопротивление слоя пыли, $R_{пр}$ – сопротивление газового промежутка, $C_{сл}$ – емкость слоя пыли, $C_{пр}$ – емкость газового промежутка, $U_{эс}$ – напряжение на ЭС, U_{np} – напряжение на газовом промежутке, $U_{сл}$ – напряжение на слое пыли, $h_{пр}$ – ширина газового промежутка, $h_{эс}$ – межэлектродное расстояние, $h_{сл}$ – толщина слоя пыли, $J_{КР}$ – плотность тока КР, ОЭ – осадительный электрод, КЭ – коронирующий электрод

пряжения зажигания КР U_0 , тем самым снижая интенсивность горения КР и эффективность улавливания пыли. Асимптотическое приближение зависимости $U_{np}(h_{сл})$ к напряжению зажигания КР U_0 описывает известный эффект запирания КР при оседании пыли с высоким удельным электрическим сопротивлением на ОЭ. С другой, стороны рост напряжения приложенного к слою пыли $U_{сл}(h_{сл})$ повышает вероятность пробоя слоя и возникновения обратной короны.

Слой пыли с конечной диэлектрической проницае-

мостью $\epsilon_{\text{П}}$ обладает электрической емкостью $C_{\text{сл}}$. В данном случае роль обкладок выполняют заземленный ОЭ и внешняя поверхность слоя пыли с потенциалом равным $U_{\text{сл}}$. Поверхность КЭ и поверхность слоя пыли также образуют электрическую емкость $C_{\text{пр}}$ включенную последовательно с $C_{\text{сл}}$. Емкость $C_{\text{сл}}$ и $C_{\text{пр}}$ определяют суммарную емкость ЭС, величина которой также будет зависеть от слоя осевшей на электродах пыли:

$$\frac{1}{C_{\text{эс}}} = \frac{h_{\text{сл}}}{\epsilon_{\text{П}}\epsilon_0 S_{\text{ОЭ}}} + \frac{h_{\text{пр}}}{\epsilon_{\text{Г}}\epsilon_0 S_{\text{КЭ}}} \quad (6)$$

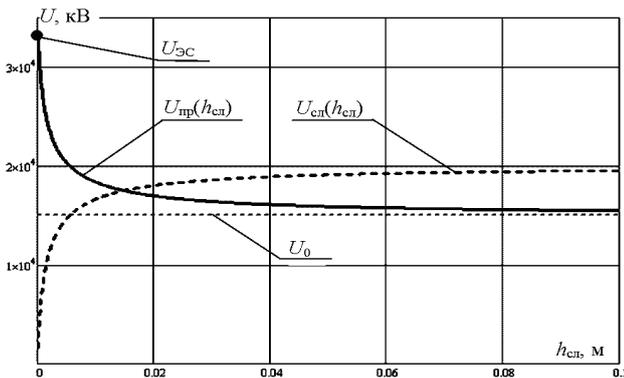


Рисунок 3 – Изменение распределения напряжений в разрядном промежутке ЭС ЭФ при оседании слоя пыли на электродах.

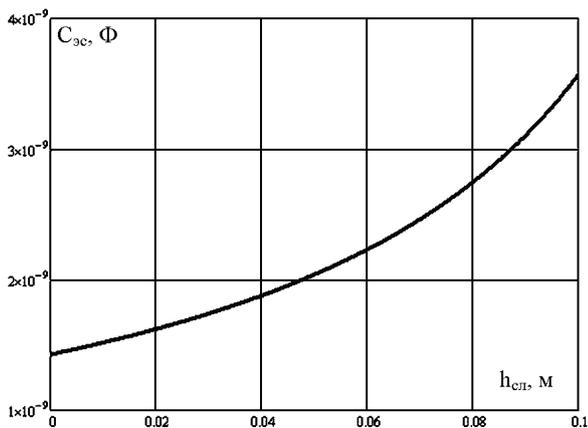


Рисунок 4 – Характер изменения электрической емкости ЭС при оседании слоя пыли на осадительный электрод.

Преобразуя выражение 6 относительно в $h_{\text{сл}}$ получим:

$$C_{\text{эс}}(h_{\text{сл}}) = \frac{\epsilon_{\text{Г}}\epsilon_{\text{П}}\epsilon_0 S_{\text{КЭ}} S_{\text{ОЭ}}}{h_{\text{сл}}\epsilon_{\text{Г}}(S_{\text{КЭ}} - S_{\text{ОЭ}}) + \epsilon_{\text{П}} S_{\text{ОЭ}} h_{\text{сл}}}, \quad (7)$$

где $\epsilon_{\text{Г}}$ – диэлектрическая проницаемость газа, $\epsilon_{\text{П}}$ – диэлектрическая проницаемость пыли, ϵ_0 – диэлектрическая постоянная, $S_{\text{КЭ}}$ – площадь КР, м^2 , $S_{\text{ОЭ}}$ – площадь ОЭ, м^2 .

При питании ЭФ источником постоянного напряжения, входящим в состав системы комбинированного питания, характер изменения емкости ЭС не представляет особого интереса и не влияет на режим работы источника напряжения. Определяющее влияние имеет толщина слоя пыли на ОЭ и его УЭС.

Использование источников комбинированного питания призвано формировать импульсно-периоди-

ческое напряжение с постоянной составляющей на ЭС ЭФ. Формирование импульсов напряжения определенной длительности и амплитуды во многом зависит от характера нагрузки источника импульсного питания. Длительность фронта импульса для источников такого типа пренебрежимо мала в сравнении со сроком. В свою очередь, срез импульса напряжения определяется характером нагрузки и зависит от постоянной времени ЭС. Постоянная времени ЭС формируется общей емкостью электродной системы и общим сопротивлением протеканию тока КР. Учитывая приведенные выше зависимости постоянную времени ЭС в зависимости от слоя осевшей пыли и приложенного к ЭС напряжения можно выразить как:

$$\tau_{\text{эс}}(U_{\text{эс}}, h_{\text{сл}}) = \frac{U_{\text{эс}} C(h_{\text{сл}})}{A(U_{\text{пр}}(h_{\text{сл}}) - U_0) U_{\text{пр}}(h_{\text{сл}}) L_{\text{кр}}} \quad (8)$$

Полученное в результате выражение для постоянной времени ЭС является важнейшей характеристикой необходимой для дальнейшего проектирования источников комбинированного питания для улавливания пыли с высоким удельным сопротивлением. Величина постоянной времени для некоторых условий работы фильтра позволяет определить диапазон регулирования частоты следования импульсов напряжения формируемых импульсным источником для реализации различных режимов питания электрофильтра. Также, диапазон регулирования частоты позволяет оценить мощность источника импульсного напряжения, необходимую для реализации комбинированного питания ЭФ.

Список литературы. 1. Алиев Г.М. Электрооборудование и режимы питания электрофильтров / Г.М. Алиев, А.Е. Гоник. – М.: Энергия, 1968. – 128 с. **2.** Богуславский Л.З. Создание макетных образцов высоковольтного оборудования комплексных систем электрофильтрации экологически опасных промышленных выбросов / Л.З. Богуславский, Л.Н. Мирошниченко, В.В. Диордийчук, Д.В. Винниченко, Н.С. Ярошинский // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – 2012. – № 52 (958). – С. 31-38. **3.** Богуславский Л.З. Высоковольтный высокочастотный импульсный источник питания для повышения эффективности систем газоочистки / Л.З. Богуславский, В.В. Диордийчук, Л.Н. Мирошниченко, Ю.Г. Казарян, Н.С. Ярошинский // Техн. електродинаміка. – 2012. – № 2. – С. 99–100. **4.** Санаев Ю.И. Обеспыливание газов электрофильтрами / Ю.И. Санаев. – Семибратово: Кондор-Эко, 2009. – 170 с. **5.** Переводчиков В.И. Источники знакопеременного, импульсного и импульсно-знакопеременного питания электрофильтров / В.И. Переводчиков, В.Н. Шапенко, А.В. Щербаков, В.Г. Калинин, В.М. Стученков // Электрические станции. – 2003. – № 1. – С. 56–61. **6.** Щерба А.А. Закономерности повышения скорости нарастания разрядных токов в нагрузке при ограничении их максимальных значений / А.А. Щерба, Н.И. Супруновская // Техн. електродинаміка. – 2012. – № 5. – С. 3–9. **7.** Щерба А.А. Синтез электрических цепей с емкостными накопителями энергии в полупроводниковых формирователях мощных разрядных импульсов / А.А. Щерба, Н.И. Супруновская // Техн. електродинаміка. – 2014. – № 1. – С. 3–11. **8.** Диордийчук В.В. Регулирование параметров источников импульсного и постоянного напряжений при одновременном питании электрофильтров / В.В. Диордийчук // Техн. електродинаміка. – 2014. – № 4. – С. 132–134. **9.** Ужов В.Н. Очистка промышленных газов электрофильтрами / В.Н. Ужов. – М.: Химия, 1967. – 344 с. **10.** Чекалов Л.В. Электри-

ческие режимы и источники питания электрофильтров // *Л.В. Чекалов // Промышленная и санитарная очистка газов.* - 1982. - С. 1-18.

Bibliography (transliterated): 1. Aliev G.M., Gonik A.E. *Jelektrooborudovanie i rezhimy pitaniya jelektrofil'trov.* Moscow: Jenergija, 1968. 128 p. 2. Boguslavskij L.Z. L.N. Miroshnichenko, V.V. Diordijchuk, D.V. Vinnichenko, N.S. Jaroshinskij. *Sozdanie maketnyh obrazcov vysokovol'tnogo oborudovanija kompleksnyh sistem jelektrofil'tracii jekologicheski opasnyh promyshlennyh vybrosov.* Visnik NTU "KhPI". Serija: Tehnika ta elektrofizika visokih naprug. 2012. No 52 (958). pp. 31-38. 3. Boguslavskij L.Z. V.V. Diordijchuk, L. N. Miroshnichenko, Ju. G. Kazarjan, N. S. Jaroshinskij *Vysokovol'tnyj vysokochastotnyj impu'snyj istochnik pitaniya dlja povyshenija jeffektivnosti sistem gazoochistki.* Tehn. elektrodinamika. 2012. No 2. pp. 99-100. 4. Sanaev Ju.I. *Obespylivanie gazov jelektrofil'trami.* Semibratovo: Kondor-Eko. 2009. 170 p. 5. Perevodchikov V.I., Shapenko V.N., Shherbakov A.V., Ka-

linin V.G., Stuchenkov V.M. *Istochniki znakoperemennogo, impu'snogo i impu'sno-znakoperemennogo pitaniya jelektrofil'trov.* Jelektricheskie stancii. 2003. No 1. pp. 56-61. 6. Shherba A.A., Suprunovskaja N.I. *Zakonomernosti povyshenija skorosti narastanija razrjadnyh tokov v nagruzke pri ogranichenii ih maksimal'nyh znachenij.* Tehn. elektrodinamika. 2012. No 5. pp. 3-9. 7. Shherba A.A., Suprunovskaja N.I. *Sintez jelektricheskikh cepej s emkostnymi nakopiteljami jenerгии v poluprovodnikovyh formirovateljah moshhnyh razrjadnyh impu'sov.* Tehn. elektrodinamika. 2014. No 1. pp. 3-11. 8. Diordijchuk V.V. *Regulirovanie parametrov istochnikov impu'snogo i postojannogo naprjazhenij pri odnovremennom pitanii jelektrofil'trov.* Tehn. elektrodinamika. 2014. No 4. pp. 132-134. 9. Uzhov V.N. *Ochistka promy'shlenny'kh gazov e'lektrofil'trami.* Moscow: Himiia, 1967. 344 p. 10. Chekalov L.V. *E'lektricheskie rezhimy i istochniki pitaniia e'lektrofil'trov.* Promy'shlennaia i sanitarnaia ochistka gazov. 1982. pp. 1-18

Поступила (received) 05.02.2015

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Богуславский Леонид Зиновьевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, г. Николаев; тел.: (063) 474-60-50; e-mail: boguslavsky@mail.ru.

Boguslavskiy Leonid Zinov'evich – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Senior Researcher, Institute of Pulse Processes and Technologies, Mykolaiv; phone.: (063) 474-60-50; e-mail: boguslavsky@mail.ru.

Диордийчук Виталий Владимирович – младший научный сотрудник Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, г. Николаев; тел.: (063) 816-17-51; e-mail: redlineone86@gmail.com

Diordiychuk Vitaliy Vladimirovich – Junior Researcher, Institute of Pulse Processes and Technologies, Mykolaiv; phone.: (063) 816-17-51; e-mail: redlineone86@gmail.com

УДК 621.317

О. Ю. ГЛЕБОВ, С. В. КИПРИЧ, Г. М. КОЛИУШКО, А. В. ПЛИЧКО

ПРОВЕРКА СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ УРАВНИВАНИЯ ПОТЕНЦИАЛОВ ЭНЕРГООБЪЕКТОВ

Приведены основные требования нормативных документов, предъявляемые к основной и дополнительной системам уравнивания потенциалов (СУП). Показано, что можно использовать в качестве защитных проводников СУП, их сечение, каким образом прокладывать и выполнять соединение и присоединение защитных проводников. Приведен перечень документов, передаваемых монтажной организацией при передаче электроустановки в эксплуатацию, содержание паспорта на заземляющее устройство (ЗУ) электроустановки. Описаны мероприятия, предназначенные для проверки состояния СУП. Приведены примеры проведения проверок СУП. Сформулированы основные недостатки выполнения СУП. Основной вывод: проверку состояния СУП целесообразно совмещать с проверкой ЗУ и СМЗ.

Ключевые слова: электробезопасность, заземление, уравнивание потенциалов, испытание электроустановок.

Введение. Основными нормативными документами, регламентирующими требования к СУП, являются [1 – 10]. *Основное правило обеспечения электробезопасности* сформулировано в Правилах устройства электроустановок (п. 1.7.54) [1]: «Опасные токоведущие части электроустановки не должны быть доступными для случайного прямого прикосновения к ним, а доступные для прикосновения открытые и сторонние проводящие части не должны быть опасными как в нормальных условиях (эксплуатация электроустановки по назначению и без повреждений), так и в условиях единичного повреждения». Из этого правила следует, что единственным параметром, характеризующим электробезопасность, является напряжение прикосно-

вения.

Уравнивание потенциалов (см. п. 1.7.56 [1]) является одним из средств защиты, предназначенных для предотвращения поражения электрическим током в случае повреждения изоляции, наряду с защитным заземлением, выравниванием потенциалов и др. Указанные средства защиты гальванически соединены между собой, т.е. представляют собой некую единую систему обеспечения электробезопасности. Поэтому проверку (диагностику) систем уравнивания (СУП) и выравнивания (СВП) потенциалов целесообразно совмещать во времени с проверкой заземляющего устройства (ЗУ) и системы молниезащиты (СМЗ). Это в равной степени относится не только к энергетическим

© О. Ю. Глебов, С. В. Киприч, Г. М. Колиушко, А. В. Пличко, 2016