

УДК 620.179

**В. Е. КРИВОНОСОВ**

Приазовский государственный технический университет

**М. В. БАЧИНСКИЙ**

Тернопольский национальный технический университет им. И. Пулюя

**Д.Х. ШТОФЕЛЬ, И.А. КРИВОРУЧКО**

Винницкий национальный технический университет

## **ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВРЕМЕНИ ПРОТЕКАНИЯ АВАРИЙНОГО ПРОЦЕССА В СОЕДИНЕНИИ ТОКОВЕДУЩИХ ЧАСТЕЙ МЕДИЦИНСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

*Неотъемлемой частью современного диагностического и лечебного процесса в любом медицинском учреждении является сложная стационарная электронная медицинская аппаратура и оборудование. Особенно актуальным вопросом для массивной стационарной аппаратуры (томографы, рентген-аппараты, системы жизнеобеспечения, мониторные системы, приборы ультразвуковой диагностики, литотриптеры, КВЧ-аппаратура и др.), которая потребляет большую мощность, либо в сети которой протекает ток значительной силы, является механическое ослабление токопроводящих элементов в системе электропитания медицинского оборудования. Было доказано, что ослабление токоведущего соединения приводит к уменьшению постоянной его нагрева  $\tau$ , а величина постоянной нагрева определяет время установления теплового режима токоведущих соединений. Согласно с экспериментальными данными, полученными в работе, построены графические зависимости изменения температуры токоведущих соединений в электромедицинском оборудовании от времени, которые подтверждают теоретические выводы.*

*Ключевые слова: медицинское оборудование, приборы, соединение, стационарная аппаратура.*

V.E. KRIVONOSOV

Priazovsky National Technical University

M.V. BACHINSKIY

Terнопol National Technical University. I. Pulyui

D.X. SHTOFEL, I.A. KRIVORUCHKO

Vinnitsa National Technical University

## **PREDICTION FLOW TIME OF EMERGENCY IN CURRENT-CARRYING PARTS COMPOUNDS OF MEDICAL EQUIPMENT**

*An integral part of modern diagnostic and therapeutic process at any medical institution is a complex stationary electronic medical devices and equipment. Particularly relevant issue for the massive stationary equipment (scanners, X-ray devices, life support systems, monitoring systems, devices, ultrasound diagnostics, lithotripters, short-wave equipment, etc.), which consumes a lot of power, or in which the mains current large power flows, is a mechanical the weakening of the conductive elements in the system of medical equipment supply. It has been proven that the weakening of the current-carrying connections reduces its heating constant  $T$ , and the value of the constant determines the heating time of the establishment of the thermal regime of the current-carrying connections. According to the experimental data obtained in the work, built a graph of the temperature change in the current-carrying connections electro medical equipment from time to time, which confirm the theoretical conclusions.*

*Keywords: medical equipment, devices, connection, stationary equipment.*

### **Введение**

Сложная стационарная электронная медицинская аппаратура и оборудование является неотъемлемой частью современного диагностического и лечебного процесса в любом медицинском учреждении. Государственные и межгосударственные стандарты требуют от медицинского оборудования повышенной электробезопасности, в том числе защиту от отказов аппаратуры [1–3]. Существует большое разнообразие систем обеспечения бесперебойного питания электроаппаратуры [4], в том числе медицинской [5]. Но существует еще один важный вопрос – механическое ослабление токопроводящих элементов в системе электропитания медицинского оборудования. Особенно актуален он для массивной стационарной аппаратуры (томографы, рентген-аппараты, системы жизнеобеспечения, мониторные системы, приборы ультразвуковой диагностики, литотриптеры, КВЧ-аппаратура и др.), которая потребляет большую мощность, либо в сети которой протекает ток значительной силы [6].

### **Постановка проблемы**

Статистические исследования причин отключения, простоя и прекращения обследования пациентов при помощи ультразвуковой, рентгеновской и томографической магниторезонансной аппаратуры, проведенные на «НПП Инфотехмед» (город Тернополь), показали, что остановки работы оборудования, связанные с ослаблением токоведущих соединений, составили 5–12 % от общего числа аварий. Ослабление токоведущего соединения приводит к его перегреву, выгоранию соединения, повреждению коммутационной аппаратуры, к искажениям результатов обследования больного и коротким замыканиям в системе электроснабжения медицинского оборудования [7].

### **Анализ последних исследований**

Для задач контроля состояния токоведущего соединения существует ряд методов и устройств.

Одним из методов является определение плотности болтового соединения по звуковому сигналу, возникающему при механическом обстукивании соединения. Для определения перегрева токоведущего соединения в период проведения планово-предупредительного ремонта используют тепловизоры [8, 9] и пирометры [10]. Недостатком этих способов является невозможность контролировать токоведущие соединения в период работы оборудования и своевременно выявлять начальный момент развития аварийной ситуации, а также их относительно высокое энергопотребление и цена.

Широкое применение находят устройства, которые обеспечивают непрерывный контроль температуры контактного соединения [11]. В таких устройствах осуществляется контактный контроль температуры болтового (винтового и др.) соединения при помощи встроенных термоэлементов. Передача информации о температуре контактов на диспетчерский пункт позволяет персоналу судить о состоянии контактного соединения, а при достижении критического значения температуры, например 150 °С, произвести аварийное отключение оборудования.

К недостаткам таких устройств можно отнести то, что только по температуре контактного соединения нельзя достоверно определить момент начала развития аварийного процесса и рассчитать время, за которое ослабленное соединение достигнет аварийного состояния. Как известно [12], температура контактного соединения зависит не только от переходного сопротивления, но и от квадрата силы тока нагрузки, протекающего через переходное сопротивление. В зависимости от нагрузки величина силы тока может менять свое значение в пределах  $(0,95 \div 1,05) I_n$ , соответственно, температура исправного болтового соединения может отличаться от температуры окружающей среды  $t^{\circ}C$  до нормируемой допустимой  $t_{нор}$ , но не более, чем на 150°С. Кроме того, температура окружающей среды может изменяться в пределах  $-35 \dots +45$  °С, влияя при этом на температуру болтового соединения, что делает невозможным выявить начало увеличения переходного сопротивления, то есть определить начало возникновения предаварийной ситуации. В этих технических решениях невозможно прогнозировать время развития аварийной ситуации. В устройствах [13, 14] осуществляется контактный контроль температуры болтового соединения, контроль температуры окружающей среды и контроль величины силы тока. Величина силы тока преобразуется в соответствующий тепловой сигнал. При этом сравниваются полученные тепловые сигналы и на основании этого делаются выводы об увеличении переходного сопротивления болтового соединения, что является маркером начала развития аварийной ситуации.

К недостаткам технического решения можно отнести то, что по температурным данным токоведущего соединения и окружающей среды невозможно определить время температурной перегрузки соединения, если величина силы тока превысила номинальное значение, а релейная защита не сработала, а это снижает безаварийность и надежность электроснабжения, а значит, и эксплуатации медицинского оборудования. Так как переходное сопротивление болтового соединения изменяется не скачкообразно, важным является определение не только момента начала развития аварийной ситуации, но и момента времени, когда изменение переходного сопротивления болтового соединения приведет к необратимой аварии. Принято считать, что медицинский персонал должен обладать некоторым уровнем знаний в области технического обеспечения лечебно-диагностического процесса [15]. Однако будет более надежно и эффективно, если информация о техническом состоянии медицинской аппаратуры будет представляться пользователю в обработанном и удобном к восприятию виде. Это позволит врачу обоснованно принимать решение о дальнейшем проведении обследования пациента при помощи аппаратуры с тепловой перегрузкой токоведущего соединения, либо произвести соответствующие коммутационные переключения и вывести пациента из зоны воздействия аппарата.

**Цель данной работы** состоит в определении времени с момента начала ослабления токоведущего соединения до достижения заданного допустимого значения его температуры за счет определения изменения постоянной времени нагрева токоведущего соединения при изменении его переходного сопротивления, что позволит расширить зону действия врача (или технического персонала медицинского учреждения) при принятии своевременного решения о дальнейшем проведении обследования пациентов.

#### Теоретическое обоснование работы

Основная проблема контактного соединения – это ослабление со временем плотности болтового, винтового, контактного разъемного и других типов соединений. Ослабление соединения приводит к увеличению переходного сопротивления контакта, в результате чего, согласно закону Джоуля-Ленца, возникает перегрев соединения с последующим развитием аварии и отключением электро медицинского оборудования (что может надолго вывести его из строя).

Важным вопросом при рассмотрении ослабления болтового соединения является прогнозирование времени, за которое температура болтового соединения достигнет критического значения (150–180°С). Зная время развития аварийной ситуации, можно планировать переключение или подготовиться к устранению аварийной ситуации.

Рассмотрим изменение постоянной нагрева токоведущего соединения при протекании в нем тока номинального значения. Тепловая модель токоведущего соединения описывается уравнением нагрева для однородного тела [16]:

$$\Delta P dt = \alpha F \Delta \theta dt + C M d\theta \quad (1)$$

где  $\Delta P = I^2 R$  – потери мощности, связанные с выделением тепла в болтовом соединении при протекании тока  $I$  и имеющие суммарное сопротивление шин и переходного сопротивления контакта  $R$ ;

$dt$  – время протекания процесса;

$\alpha$  – коэффициент теплопередачи;

$F$  – площадь поверхности болтового соединения;

$C$  – удельная теплоемкость материала, из которого выполнено болтовое соединение;

$M$  – масса болтового соединения;

$\Delta\theta$  – превышение температуры болтового соединения в сравнении с температурой окружающей среды.

Решением дифференциального уравнения (1) при неизменной силе тока, протекающей в болтовом соединении, является уравнение

$$\Delta\theta = \Delta\theta_y - (\Delta\theta_y - \Delta\theta_{нач})e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (2)$$

где  $\Delta\theta_y$  – разница температуры болтового соединения и окружающей среды в установившемся режиме;

$\Delta\theta_{нач}$  – разница температуры болтового соединения и окружающей среды в начальном режиме.

$\tau$  – постоянная нагрева болтового соединения.

Если температура болтового соединения и окружающей среды в начальном режиме одинаковы ( $\Delta\theta_{нач} = 0$ ), то уравнение нагрева имеет вид:

$$\Delta\theta = \Delta\theta_y(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (3)$$

Постоянная нагрева представляет собой время, в течении которого болтовое соединение с теплопроводностью  $C$  и массой  $M$  нагревается до температуры  $\Delta\theta_y$  от начальной температуры  $\Delta\theta_{нач}$  и отсутствия рассеяния теплоты с его поверхности. Постоянная нагрева является конструктивной константой данного болтового соединения, которую можно определить по справочным данным и параметрам болтового соединения, как

$$\tau = \frac{CMA\theta_y}{\Delta P} = \frac{CMA\theta_y}{I^2 R_c}, \quad (4)$$

где  $R_c = R_{кон} + R_{пер}$  – суммарное сопротивление контактов и переходного сопротивления соединения.

Изменение постоянной нагрева является сигналом про изменение конструктивных параметров токоведущего соединения, а именно, ослабления контакта и увеличения переходного сопротивления  $R_{пер}$  либо увеличения силы тока, протекающего через соединение.

Решением уравнения (1) для определения времени нагрева до температуры  $\Delta\theta_y$  является выражение

$$t = \tau \ln \frac{\Delta\theta_y - \Delta\theta_{нач}}{\Delta\theta_y - \Delta\theta} \quad (5)$$

На рис. 1 приведены аналитически полученные графики изменения температуры токоведущего соединения при исправном и ослабленном соединении.

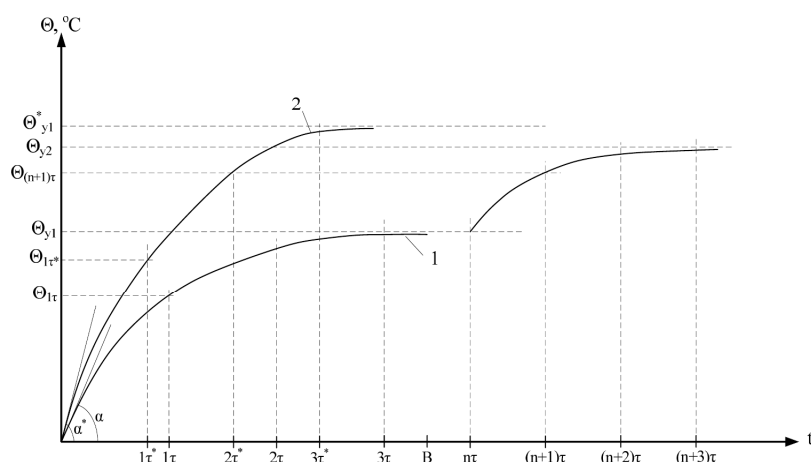


Рис. 1. График изменения температуры токоведущего соединения при исправном и ослабленном соединении

Кривая 1 (на отрезке времени 0–B) показывает изменения температуры исправного соединения при протекании через него номинального тока  $I_n$ . Кривая 2 показывает изменение температуры ослабленного соединения при протекании через него того же тока  $I_n$ .

Угол  $\alpha$  характеризует скорость нагрева болтового соединения при постоянной нагрева  $\tau$  и определяется как

$$V = \frac{\theta_1 \tau - \theta_{нач}}{\tau} \quad (6)$$

Скорость нагрева остается неизменной при различных начальных температурах болтового соединения, а длительность нагрева зависит от постоянной времени нагрева данного соединения и величины тока, протекающего через него. Постоянную времени нагрева с погрешностью до 5 % можно определить как

$$\tau = \frac{\theta_1 \tau - \theta_{нач}}{3} \quad (7)$$

Подразумевается, что  $3\tau$  – это период времени, за который исправное болтовое соединение нагреется от первоначальной температуры  $\theta_{нач} = \Delta\theta_o = \theta_{окр.сред.}$  до установившейся температуры  $\theta_{y1}$  при номинальном значении силы тока.

Увеличения силы тока, протекающего через болтовое соединение (т. н. ток перегрузки  $I_{nn}$ ), более, чем на 10 %, т. е. когда он становится равным  $1,1 I_n$  (допустимое значение тока для срабатывания устройств релейной защиты), при неизменной величине  $\tau$  приведет к дополнительному росту температуры болтового соединения  $\theta_y^*$ , которое определяется выражением

$$\Delta\theta_y^* = \Delta\theta_y K^2, \quad (8)$$

где  $K = \frac{I_{nn}}{I_n}$  – кратность тока в болтовом соединении.

Скорость нагрева при увеличении силы тока определится выражением

$$V_n = \frac{\theta(n+1)\tau - \theta_{y1}}{\tau_n} \quad (9)$$

Превышения тока, протекающего в болтовом соединении, на 10 % приведет к изменению скорости не более, чем на 10 %, поэтому для дальнейших расчетов можно считать, что постоянные нагрева в пределах 10 % равны.

Для нормального болтового соединения суммарное сопротивление определим из выражения (4) как

$$R_c = \frac{CM\Delta\theta_y}{I^2\tau} \quad (10)$$

В следствии ослабления болтового соединения скорость нарастания температуры  $V_t^*$  соединения увеличивается при неизменной силе тока, протекающего в болтовом соединении (кривая 2 на рис. 1), и определится как отношение разности температур и интервала времени, за которое произошло это изменение:

$$V_t^* = \frac{\theta_1 \tau^* - \theta_{нач}}{\tau^*} \quad (11)$$

Изменения постоянной нагрева определим как

$$\tau^* = \tau k_v, \quad (12)$$

где  $k_v = \frac{v}{vt^*}$  – кратности скоростных изменений.

Для ослабленного состояния болтового соединения определяют новое значение переходного сопротивления  $R_{cn}^*$  и мощность, приводящую к нагреву болтового соединения.

Время, за которое превышения температура болтового соединения достигнет критической величины, определим как:

$$T_{дон} = \tau \frac{\Delta(\theta_{дон})}{\Delta\theta_y (K_p^2 - 1)}, \quad (13)$$

где  $K_p$  – кратность величин сопротивлений болтового соединения до и после ослабления контактов, либо кратность тока до и после увеличения тока нагрузки.

Таким образом, изменение величины постоянной нагрева болтового соединения может однозначно определить его техническое состояние. Уменьшение величины постоянной нагрева более, чем на 10 % от номинального значения определяет начало аварийной ситуации. Задаваясь величиной критической температуры болтового соединения, время, за которое эта температура будет достигнута, определяется выражением (13). Из этих соображений становится возможным прогнозировать развитие аварийной ситуации в электрометаллическом оборудовании, контролируя значение постоянной времени нагрева токоведущих соединений.

Контроль температурных и токовых параметров позволяет разработать способ прогнозирования времени развития аварийной ситуации на электрометаллическом оборудовании. Суть способа заключается в следующем. Производят контактное измерение температуры токоведущего соединения, с помощью температурного датчика, жестко закрепленного на болтовом соединении. Полученные значения температур корректируют в соответствии с данными значений температур окружающей среды, при этом одновременно контролируется сила тока, протекающего в соединении. Фиксируют время от начала протекания тока в

соединении до момента стабилизации температуры соединения ( $dT/dt=0$ ). По полученным данным вычисляют первоначальное значение постоянной времени нагрева при помощи выражения (7), величину сопротивления болтового соединения (10) и скорость его нагрева (11). По полученному значению величин силы тока, температуры окружающей среды и токоведущего соединения вычисляют текущее значение постоянной времени нагрева с помощью выражения (12) и сравнивают полученный результат с первоначальным значением постоянной нагрева. Если сила тока изменяется в пределах 10 %, то уменьшение постоянной времени нагрева также в пределах 10 % свидетельствует о неизменной величине переходного сопротивления токоведущего соединения. По выражению (13) определяют время, за которое величина температуры соединения достигнет допустимого значения. При уменьшении постоянной времени нагрева более, чем на 10 % от первоначального значения можно делать вывод о начале изменения переходного сопротивления и начальном моменте ослабления токоведущего соединения, то есть начале развития аварийной ситуации. Также определяют время, за которое температура болтового соединения достигнет критического значения, когда дальнейшая эксплуатация медицинского оборудования должна быть прекращена.

### Эксперимент, его результаты и их обсуждение

На основе анализа конструкции токоведущих соединений в системе электропитания медицинского оборудования, были физически смоделированы контактные токоведущие соединения и собрана экспериментальная установка, структурная блок-схема которой приведена на рис 2.

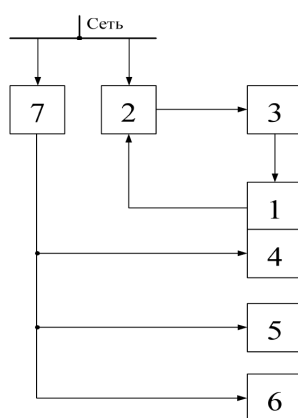


Рис. 2. Блок-схема экспериментальной установки

На схеме обозначен блок 1 – непосредственно само болтовое соединение, выполненное из медных шин сечением  $2,5 \text{ мм}^2$ , соединенных с помощью болтов М6.

Блок 2 – это источник регулируемого тока. В качестве источника использован генератор переменного тока ПСМ АД 50, позволяющий получать напряжение 0,4 кВ и ток силой от 10 до 100 А.

Блок 3 – трансформатор тока, позволяющий регулировать и контролировать силу тока, протекающего в токоведущем соединении. В качестве преобразователя тока использован трансформатор тока ТТ 100/5 напряжением 0,4 кВ. Во вторичную цепь включен амперметр типа АБ-0,4, класс точности 1 %.

Блок 4 – измеритель температуры болтового соединения. Для измерения температуры использован терморезистор, жестко прикрепленный к болтовому соединению. В качестве указателя температуры использован цифровой измеритель температуры ИТ-5Т «Термит» (зарегистрирован в госреестре средств измерения под № 27526-04, шаг измерения  $0,05 \text{ }^\circ\text{C}$ ) с цифровой индикацией температуры.

Блок 5 – измерение температуры окружающей среды, использован измеритель температуры ИТ-5Т «Термит» с цифровой индикацией температуры.

Блок 6 – таймер с указателем времени.

Блок 7 – стандартный блок питания на 220 В, служащий для электропитания блоков 4, 5, 6.

В лабораторной установке болтовое соединение 1 с трансформатором тока 3 соединены в последовательную цепь с источником регулируемого тока 2, который включен в сеть. Блоки измерения температур 4 и 5, а также блок измерения времени 6 подключены к блоку питания 7, который включен в сеть.

Работа предложенного способа была проверена на описанной экспериментальной установке. Сперва в лабораторных условиях проверили изменение температуры исправного болтового соединения. Результаты представлены на рис. 3 (кривая 1). Измеренная прибором ИП-5Т температура окружающей среды была равна  $26 \text{ }^\circ\text{C}$ . Блок 7 подключили в сеть и подали питание к блокам измерения температур 4 и 5, а также к блоку таймера 6. Включили источник тока 2 и установили силу тока в болтовом соединении, равную 10 А. По полученным данным построили временную зависимость роста температуры исправного болтового соединения.

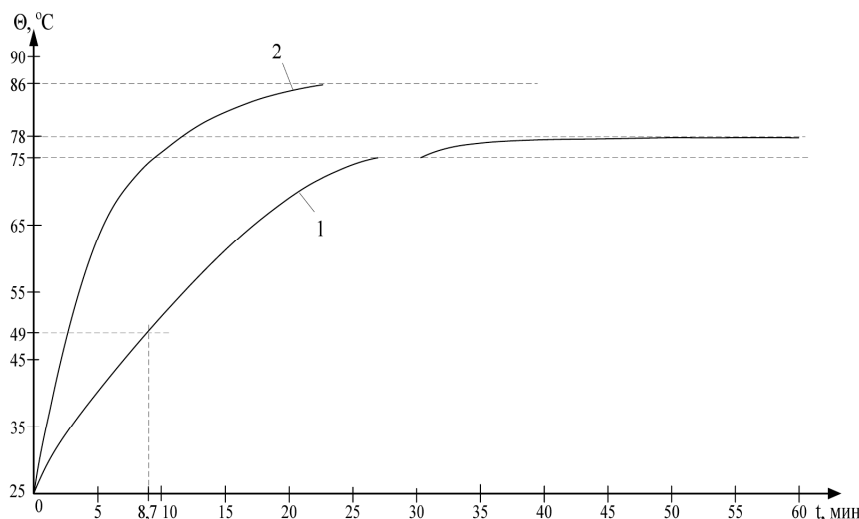


Рис. 3. График изменения температуры болтового соединения: кривая 1 – исправное соединение; кривая 2 – ослабленной соединении (на 50 % от первоначального состояния)

За 26 минут разница температуры болтового соединения и температуры окружающей среды  $\Delta\theta$  у составило 50 °С.

По формуле (6) определили постоянную нагрева исправного болтового соединения:

$$\tau = \frac{26}{3} = 8,7 \text{ мин.}$$

Скорость нагрева определили по формуле (7):

$$V = 3,3 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{мин}}.$$

Величину сопротивления исправного болтового соединения определили по формуле (10).

Отметим, что для лабораторной установки  $C = 390 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \times ^{\circ}\text{C}}$ ,  $M = 8,93 \times 10^3 \times 4 \times 10^{-6} \times 0,1 = 0,0035$  кг. Таким образом:

$$R = \frac{390 \times 0,00035 \times 26}{10^2 \times 8,7 \times 60} = 0,7 \times 10^{-3} \text{ Ом.}$$

Увеличив силу тока до 11 А, получили превышение температуры от начального нагрева 53 °С. Скорость нагрева для аналогичных участков кривых нагрева при токе, равном 1,1  $I_n$ , составила

$$V = \frac{3}{5} = 0,6 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{мин}}.$$

Скорость нагрева при номинальном токе составила

$$V_{In} = \frac{3}{5,5} = 0,55 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{мин}}.$$

Постоянная нагрева, рассчитанная по формуле (12), уменьшилась на 8% и составила

$$\tau_1 = 8,7 \frac{5,5}{6} = 8 \text{ мин.}$$

Время, за которой температура болтового соединения достигнет 100 °С, определили по формуле (13):

$$T = 8 \frac{56}{50(1,1^{2-1})} = 40,1 \text{ мин.}$$

Далее опыты проводили с неисправным болтовым соединением, ослабление которого составило около 50 %.

Силу тока в ослабленном болтовом соединении установили 10 А. Полученная временная зависимость приведена на рис. 3 (кривая 2).

Время, за которое разница температур болтового соединения и окружающей среды возросла до 26 °С, оказалось равным  $t^* = 3,5$  мин.

При этом скорость нагрева

$$V^* = 7,47 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{мин}}.$$

Постоянная времени нагрева  $\tau^* = 8,7 \frac{3,3}{7,47} = 3,84$  мин. Постоянная нагрева уменьшилась на 62 %, что свидетельствует об аварийном режиме.

Величина сопротивления, вычисленная по формуле (10), увеличилась в 2,64 раза и составила  $R^* = 1,85 \times 10^{-3}$  Ом.

Время, за которое болтовое соединение достигнет температуры 200 °С:

$$T_{авар} = 3,3 \frac{175}{50(1-0,38)} = 18,6 \text{ мин.}$$

Проведенные испытания показали, что изменение постоянной нагрева болтового соединения можно использовать в качестве объективного критерия, по которому можно однозначно определять начало процессов ослабления болтового токоведущего соединения в системах электропитания медицинской аппаратуры. Контроль постоянной нагрева дает возможность определять начальный момент развития аварийной ситуации и, соответственно, принимать те или иные меры технического или организационного характера.

Заблаговременная сигнализация о развитии аварийной ситуации позволяет без рисков для жизни и здоровья пациентов, а также без уменьшения пациентопотока в медицинском учреждении произвести техническое обслуживание или ремонт соответствующего медицинского оборудования.

#### Выводы

1. Изменение постоянной нагрева болтовых токоведущих соединений более, чем на 10 %, является критерием, по которому можно однозначно определять начало развития процессов ослабления болтового соединения в системах электропитания медицинской аппаратуры.

2. Ослабление токоведущего соединения приводит к уменьшению постоянной его нагрева  $\tau$ .

3. Величина постоянной нагрева определяет время установления теплового режима токоведущих соединений.

4. Определение длительности периода времени с момента ослабления соединения до аварийного отключения медицинского оборудования позволяет расширить функциональные возможности врача (или другого ответственного лица) для принятия решений о проведении обследований пациентов при помощи данного оборудования.

5. Согласно с экспериментальными данными, полученными в работе, построены графические зависимости изменения температуры токоведущих соединений в электромедицинском оборудовании от времени, которые подтверждают теоретические выводы.

#### Литература

1. ГОСТ 20790-93 Приборы, аппараты и оборудование медицинские. Общие технические условия : межгосударственный стандарт [Электронный ресурс] // Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. – Режим доступа : <http://docs.cntd.ru/document/gost-20790-93> (дата обращения 17.03.2017).

2. ДСТУ EN 60601-1:2015 Вироби медичні електричні. Частина 1. Загальні вимоги щодо безпеки та основних робочих характеристик (EN 60601-1:2006; A11:2011, IDT). – 348 с.

3. IEC/TR 60513 Fundamental aspects of safety standards for medical electrical equipment.

4. Усїйчук А. П. Проблеми забезпечення якісного електроживлення / А. П. Усїйчук, П. Б. Вовк // Наукові нотатки. – 2009. – Вип. 25. – С. 373–377.

5. Гарганеев А. Г. Применение систем бесперебойного электропитания в экстренной медицине / А. Г. Гарганеев // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308, № 7. – С. 166–171.

6. Основи біомедичного радіоелектронного апаратобудування : навчальний посібник / [Злепко С. М., Павлов С. В., Коваль Л. Г. та ін.] – Вінниця : ВНТУ, 2011. – 133 с.

7. Пищур А. Методы контроля температуры главных контактов выключателей [Электронный ресурс] / А. Пищур, С. Ефимовых // Новости электротехники. – 2012. – № 5 (77). – Режим доступа : <http://www.news.elteh.ru/arh/2012/77/09.php> (дата обращения 17.03.2017).

8. Баталова А. В. Бесконтактный контроль температуры электрических контактных соединений / А. В. Баталова, В. А. Захаренко, В. В. Зенков // Россия молодая: передовые технологии – в промышленность. – 2015. – № 1. – С. 108–111.

9. Тепловизионный контроль контактных соединений [Электронный ресурс] // Электрические сети. – Режим доступа : <http://leg.co.ua/stati/podstancii/teplovizionnyy-kontrol-kontaktnyh-soedineniy.html> (дата обращения 17.03.2017).

10. Баталова А. В. Пирометрический контроль качества электрических контактных соединений / А. В. Баталова, В. А. Захаренко, Д. Б. Пономарев // Динамика систем, механизмов и машин. – 2014. – № 2. – С. 26–29.

11. Патент RU № 2408120 Устройство для контроля температуры контактных соединений в устройствах, находящихся под высоким напряжением / Е. Н. Капля, Н. Г. Капля. – Заявл. 24.04.2009 ; опубл.

27.12.2010. – 3 с.

12. Справочник энергетика промышленных предприятий / под общей ред. А. А. Федорова, Г. В. Сербиновского и Я. М. Большама. – М.–Л. : Госэнергоиздат, 1961. – Том 1. Электроснабжение. – 840 с.

13. Патент України на винахід UA 107749 С2 Спосіб контролю за станом болтових з'єднань електрообладнання, що працює зі змінним навантаженням / В. Е. Кривоносов. – Заявл. 29.07.2013 ; опубл. 10.02.2015. – Бюл. № 3. – 4 с.

14. Патент України на винахід UA 106175 С2 Пристрій контролю і діагностики стану болтових з'єднань електрообладнання, що працює зі змінним навантаженням / В. Є. Кривоносов. – Заявл. 09.09.2013 ; опубл. 25.07.2014. – Бюл. № 14. – 3 с.

15. Физико-техническое обеспечение медицинских технологий / Г. А. Бояринов, А. Н. Кузнецов, А. Б. Кузнецов, О. И. Кушников // Медицинский альманах. – 2013. – № 2 (26). – С. 169–172.

16. Коздоба Л. А. Вычислительная теплофизика / Л. А. Коздоба. – К. : Наукова думка, 1992. – 224 с.

#### References

1. GOST 20790-93 Pribory, apparaty i oborudovanie meditsinskie. Obschie tehnicheckie usloviya : mezhgosudarstvennyy standart [Elektronnyy resurs] // Elektronnyy fond pravovoy i normativno-tehnicheckoy dokumentatsii. – Rezhim dostupa : <http://docs.cntd.ru/document/gost-20790-93> (data obrascheniya 17.03.2017).

2. DSTU EN 60601-1:2015 Virobi medichni elektrichni. Chastina 1. Zagalni vimogi schodo bezpeki ta osnovnih robochih karakteristik (EN 60601-1:2006; A11:2011, IDT). – 348 s.

3. IEC/TR 60513 Fundamental aspects of safety standards for medical electrical equipment.

4. Uslychuk A. P. Problemi zabezpechennya yakisnogo elektrozhlivnennya / A. P. Uslychuk, P. B. Vovk // NaukovI notatki. – 2009. – Vip. 25. – S. 373–377.

5. Garganev A. G. Primenenie sistem bespereboynogo elektropitaniya v ekstremnoy meditsine / A. G. Garganev // Izvestiya Tomskogo politehnicheskogo universiteta. – 2005. – T. 308, № 7. – S. 166–171.

6. Osnovi blomedichnogo radloelektronnoho aparatobuduvannya : navchalniy posibnik / [Zlepko S. M., Pavlov S. V., Koval L. G. ta In.] – VInnitsya : VNTU, 2011. – 133 s.

7. Pischur A. Metody kontrolya temperatury glavnykh kontaktov vyklyuchateley [Elektronnyy resurs] / A. Pischur, S. Efimoviy // Novosti elektrotehniki. – 2012. – № 5 (77). – Rezhim dostupa : <http://www.news.elteh.ru/arh/2012/77/09.php> (data obrascheniya 17.03.2017).

8. Batalova A. V. Beskontaktniy kontrol temperatury elektricheskikh kontaktnykh soedineniy / A. V. Batalova, V. A. Zaharenko, V. V. Zenkov // Rossiya molodaya: peredovyye tehnologii – v promyshlennost. – 2015. – № 1. – S. 108–111.

9. Teplovizionnyy kontrol kontaktnykh soedineniya [Elektronnyy resurs] // Elektricheskoe seti. – Rezhim dostupa : <http://leg.co.ua/stati/podstancii/teplovizionnyy-kontrol-kontaktnyh-soedineniy.html> (data obrascheniya 17.03.2017).

10. Batalova A. V. Pirometricheskyy kontrol kachestva elektricheskikh kontaktnykh soedineniy / A. V. Batalova, V. A. Zaharenko, D. B. Ponomarev // Dinamika sistem, mehanizmov i mashin. – 2014. – № 2. – S. 26–29.

11. Patent RU № 2408120 Ustroystvo dlya kontrolya temperatury kontaktnykh soedineniy v ustroystvakh, nahodyaschihsya pod vyisokim napryazheniem / E. N. Kaplya, N. G. Kaplya. – Zayavl. 24.04.2009 ; opubl. 27.12.2010. – 3 s.

12. Spravochnik energetika promyshlennykh predpriyatiy / pod obschey red. A. A. Fedorova, G. V. Serbinovskogo i Ya. M. Bolshama. – М.–Л. : Gosenergoizdat, 1961. – Том 1. Elektrosnabzhenie. – 840 s.

13. Patent UkraYini na vinahId UA 107749 S2 SposIb kontrolyu za stanom boltovih z'Ednan elektroobladnannya, scho pratsyuE zI zmnim navantazhennyam / V. E. Krivonosov. – Zayavl. 29.07.2013 ; opubl. 10.02.2015. – Byul. № 3. – 4 s.

14. Patent UkraYini na vinahId UA 106175 S2 PristrIly kontrolyu I dlagnostiki stanu boltovih z'Ednan elektroobladnannya, scho pratsyuE zI zmnim navantazhennyam / V. E. Krivonosov. – Zayavl. 09.09.2013 ; opubl. 25.07.2014. – Byul. № 14. – 3 s.

15. Fiziko-tehnicheskoe obespechenie meditsinskih tehnologiy / G. A. Boyarinov, A. N. Kuznetsov, A. B. Kuznetsov, O. I. Kushnikov // Meditsinskiy almanah. – 2013. – № 2 (26). – S. 169–172.

16. Kozdoba L. A. Vyichislitel'naya teplofizika / L. A. Kozdoba. – К. : Naukova dumka, 1992. – 224 s.

Рецензія/Peer review : 5.4.2017 р. Надрукована/Printed : 19.6.2017 р.

Стаття рецензована редакційною колегією