

УДК 004:519.816:614.4

С.М. ЗЛЕПКО, В.Е. КРИВОНОСОВ, С.В. ПАВЛОВ,
А.Ю. АЗАРХОВ, Д.М. БАРАНОВСКИЙ
Винницкий национальный технический университет

К современным диагностическим аппаратам относятся ультразвуковые приборы, рентгеновские компьютерные томографы, магнитно-резонансные томографы и другое медицинское оборудование. До 14 % причин возникновения аварий и неработоспособности медоборудования связаны с аварийными, технологическими, профилактическими и другими отключениями в питающей сети, приводящими к её неполнофазным режимам, появлению коммутационных перенапряжений, несимметричным режимам и образованию кратковременных провалов напряжения. Проведены исследований режимов работы рентгеновского компьютерного томографа и анализ причин аварийного выхода из строя при провалах напряжений. Разработан режим мониторинга напряжений питающей сети, фазных токов; алгоритмы диагностики и защиты от несанкционированных отключений и провалов напряжения питающей сети и выявления ослабления контактных соединений токоведущих частей с прогнозированием времени работы в предаварийном режиме.

Ключевые слова: медоборудование, томограф, защита медоборудования, питающая сеть.

S.M. ZLEPKO, V.E. KRIVONOSOV, S.V. PAVLOV, A.U. AZARCHOV, D.M. BARANOVSKY
Vinnytsa National Technical University

COMPREHENSIVE PROTECTION OF COMPUTER X-RAY TOMOGRAPHS FROM INSTABILITY AND FREQUENCY VOLTAGE PROTECTIONS

Modern diagnostic devices include ultrasonic devices, X-ray computer tomographs, magnetic resonance tomographs and other medical equipment. Up to 14% of the causes of accidents and inoperability of medical equipment are associated with emergency, technological, preventive and other disconnections in the supply network, resulting in its incomplete phase regimes, the appearance of switching overvoltages, asymmetric regimes and the formation of short-term voltage dips. Studies of the operation modes of the X-ray computer tomograph and an analysis of the causes of the emergency failure during stress failures are carried out. The mode of monitoring of the mains voltage, phase currents is developed; algorithms for diagnostics and protection against unauthorized outages and failures of the supply network voltage and for detecting the attenuation of the contact connections of current-carrying parts with prediction of the operating time in the pre-emergency mode.

Keywords: medical equipment, scanner, protection of medical equipment, feeding network.

Одной из задач развития страны является повышение продолжительности жизни населения и продление трудовой, творческой и социальной деятельности людей. Совершенствование методик диагностирования болезней и их лечение не могут на сегодняшний день обойтись без современных диагностических аппаратов и комплексов. Развитие компьютерных технологий позволило создать высокоточные средства диагностирования болезней, выявлять их симптомы на более ранней стадии, своевременно назначать и проводить коррекцию лечения, сокращая тем самым, сроки выздоровления больных.

Современные диагностические аппараты являются сложными электромеханическими устройствами, насыщенными элементами автоматики, электроники и оптики. Неисправности, возникающие при работе аппарата, можно разделить на внешние, связанные с системой электроснабжения питающей сети, и внутренние, связанные с поломками блоков и элементов самих аппаратов [1].

Таблица 1

№/№	Вид повреждения	Количество выхода из строя, %	Причина повреждения
1	Отсутствие напряжения питания	3–5	Повреждение силового и коммутационного оборудования, плановые и аварийные переключения в сети
2	Отсутствие тока в одной из фаз питания	5–7	Неполнофазный режим питающей сети, обрыв токоведущего соединения, ослабление контакта токоведущего соединения
3	Аварийное отключение и поломка инвертора	3–4	Провал напряжения в питающей сети длительностью менее 01 с.
4	Внутренние поломки и аварии	80–84	Не связанные с питающей сетью

Аварии, коммутационные переключения и неполадки в питающей сети могут быть причиной возникновения внутренней поломки диагностического оборудования или привести к получению

недостовірного результату обстеження хворого. Статистическі данні причин відключення, простою і припинення дослідження хворих ультразвуковою, рентгеновською і магніторезонансною томографічною апаратурою приведені в табл. 1. Данні отримані з використанням досвіду експлуатації і ремонтів медоборудування науково-виробничого підприємства «НВП Інфотехмед» г. Тернополя.

Данні, приведені в табл. 1, показують, що до 14 % причин виникнення аварій і непрацоспособності медоборудування пов'язані з аварійними, технологічними, профілактичними і іншими відключеннями в живлячій мережі, приводячими до неповнофазних режимів мережі, виникненню комутаційних перенапружень, несиметричним режимам і утворенню короткочасних провалів напруги. Особливо чутливими пристроями до них є РКТ. Вимоги, пред'являемі до надійності і безпеки електроживлення медических лабораторій, досліджені в [2]. Однак в роботі [2] недостатньо розглянуті питання захисту медического обладнання при виникненні аномальних режимів в живлячій мережі і токоведущих з'єднань. Одним з причин простою обладнання є ослаблення токоведущого з'єднання [3], що веде до його перегріву, вигорання з'єднання, пошкодженню комутаційної апаратури і коротким замиканням в системі електроживлення. В роботах [4, 5] досліджені причини перегріву контактних з'єднань, запропоновані методи і пристрої контролю контактних з'єднань токоведущих частин.

На сьогоднішній день розробка єдиної комплексної системи моніторингу параметрів мережі, токів навантаження, температурних показувачів болтових з'єднань токоведущих частин і захисту медоборудування, підвищення безаварійної і достовірної роботи РКТ є актуальною задачею, яка дозволить медическому персоналу самостійно приймати рішення про проведення обстеження хворого.

Проведення досліджень режимів роботи рентгеновського комп'ютерного томографа (РКТ). Аналіз причин аварійного виходу з ладу інвертора РКТ при провалах напружень. Розробка режиму моніторингу напруги живлячій мережі, фазних токів РКТ; алгоритмів діагностики і захисту РКТ від несанкціонованих відключень і провалів напруги живлячій мережі і виявлення ослаблення контактних з'єднань токоведущих частин з прогнозуванням часу роботи в передварійному режимі.

Лабораторії або медическі центри, в яких встановлені діагностическі медическі апарати, в частині рентгеновські комп'ютерні томографи (РКТ), отримують живлення як споживачі електроживлення третьої категорії. Згідно [6], електроживлення електроприймачів третьої категорії виконується від одного джерела живлення за умови, що є перерви електроживлення, необхідні для ремонту або заміни пошкоджененого елемента системи електроживлення.

Як правило, відключення живлення проводиться без попередження, а комутаційні переключення силового обладнання ведуть до провалів напруги. Включення однофазних споживачів навантаження веде до виникненню несиметрії напруги живлення. Вимоги до показувачів якості електроенергії (ПКЕ), постачаної для живлення електроспоживачів, визначені ГОСТ 10913-97 [7].

Основними ПКЕ є: відхилення напруги, несиметрія напружень, відхилення частоти, несинусоїдальність напруги, коливання напруги [7].

При визначенні значень деяких показувачів ПКЕ використовують наступні допоміжні параметри електричної енергії:

- частоту повторення змін напруги $F \Delta U t$;
- інтервал між змінами напруги $t_i, i+1$;
- глибину провалу напруги δU_n ;
- частота виникнення провалів напруги F_n ;
- тривалість імпульсу по рівню 0,5 його амплітуди $\Delta t \quad 0,5$;
- тривалість тимчасового перенапруження Δt пер U .

Провали напруги – раптове зниження напруги в системі електроживлення з наступним його відновленням до значення, що знаходиться в діапазоні допустимих значень в установившійся режимі роботи енергосистеми. В табл. 2 приведені рівні і час провалів напружень в системах електроживлення [8].

Причинами несанкціонованих відключень і провалів напруги можуть бути короткі замикання в мережі, технологіческі переключення навантажень, грозові разряди, спрацювання релейної захисту і т. д.

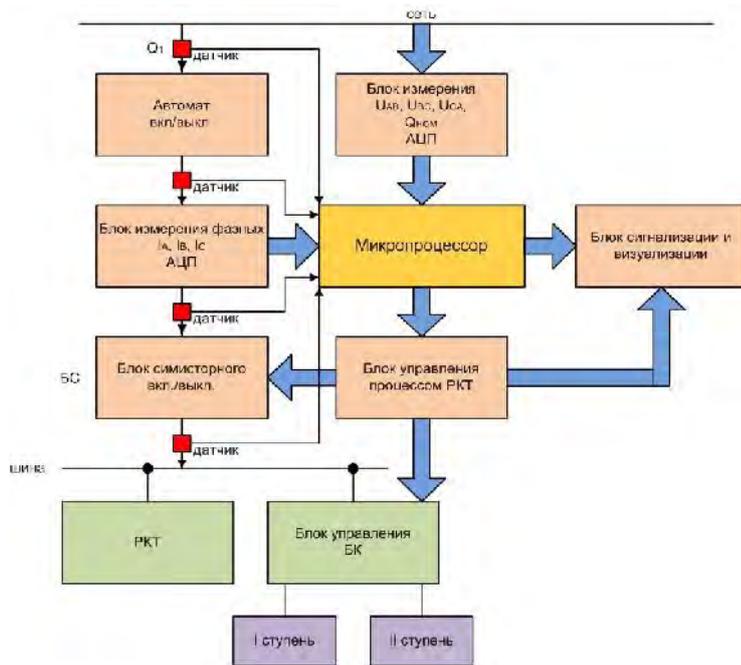
Комплексна захист РКТ заснована на моніторингу лінійних напружень, фазних токів і температурних показувачів з'єднань токоведущих частин. На рис. 1 приведена структурна схема пристрою для захисту РКТ, в якій діагностуються стан живлячій мережі і токоведущих елементів, прогнозується час розвитку аварійних процесів, забезпечується підтримання рівня напруги на шинах живлення РКТ більше 10 мс, проводиться безаварійне відключення РКТ від мережі при

выявлении аварийных режимов.

Таблица 2

[8]

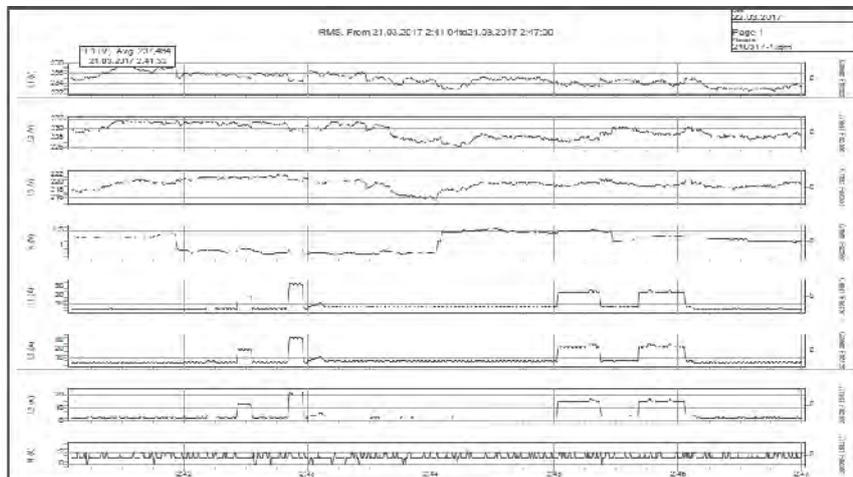
Амплитуда, % U ном	Количество провалов и прерываний в год				
	Всего	В том числе длительностью, с			
		От 0,01 до < 0,10	От 0,10 до < 0,50	От 0,50 до < 1	От 1 до < 3
От 10 до 30	145	61	66	12	6
От 30 до 60	49	8	36	4	1
От 60 до 100	24	2	17	3	2
100	41	0	12	24	5
	259	71	131	43	14
	100%	27,4%	50,6%	16,6%	5,4%



. 1.

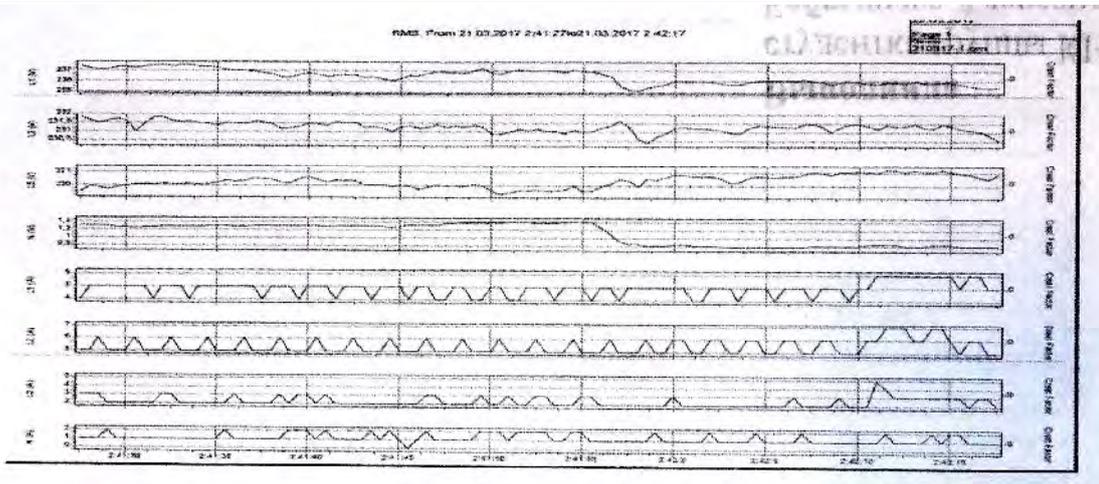
Измерения уровней линейных напряжений выявляют неполнофазный режим питающей сети, провал напряжения и несанкционированное отключение. Контроль фазных токов позволяет выявлять обрыв токоведущей части, управлять компенсационными устройствами, а при контроле температуры болтового соединения определять момент ослабления контакта и прогнозировать время развития аварии. Параллельно включенные батареи конденсаторов (БК) позволяют поддерживать напряжения на шине РКТ за счет запасенной в них энергии. Использование твердотельных реле, БК и диагностирование причин снижения напряжения на одной из фаз позволяет проводить аварийное отключение РКТ при прохождении тока нагрузки нулевого значения.

Для корректного выбора параметров БК проведены исследования параметров сети и нагрузочных характеристик РКТ (марка «Alxion 16», фирма-изготовитель «Тошиба») с помощью аттестованного прибора «Флюк 435». На рис. 2–6 приведены диаграммы изменения напряжений, фазных токов, потребления активной (P), реактивной (Q) мощностей и коэффициента мощности $\cos\alpha$ полного цикла работы РКТ в период обследования пациента.

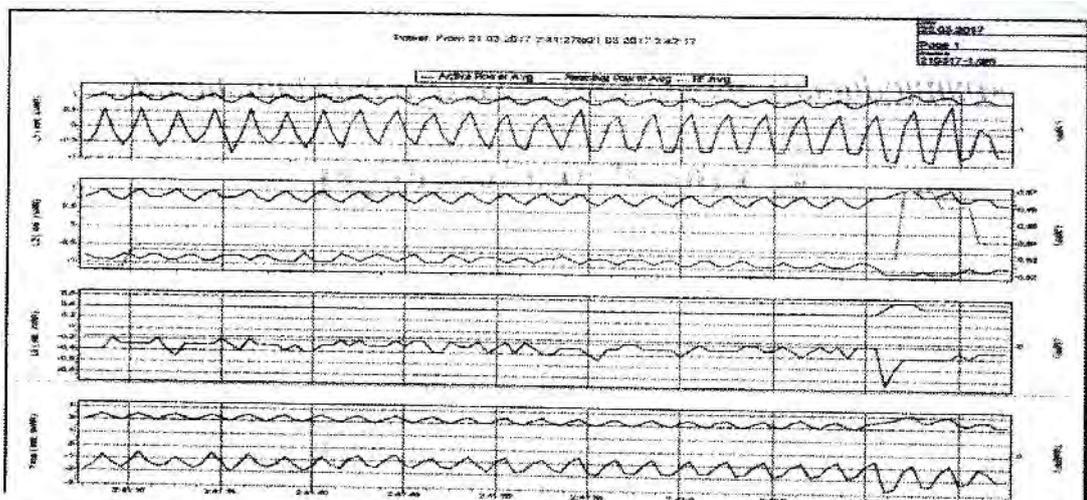


. 2.

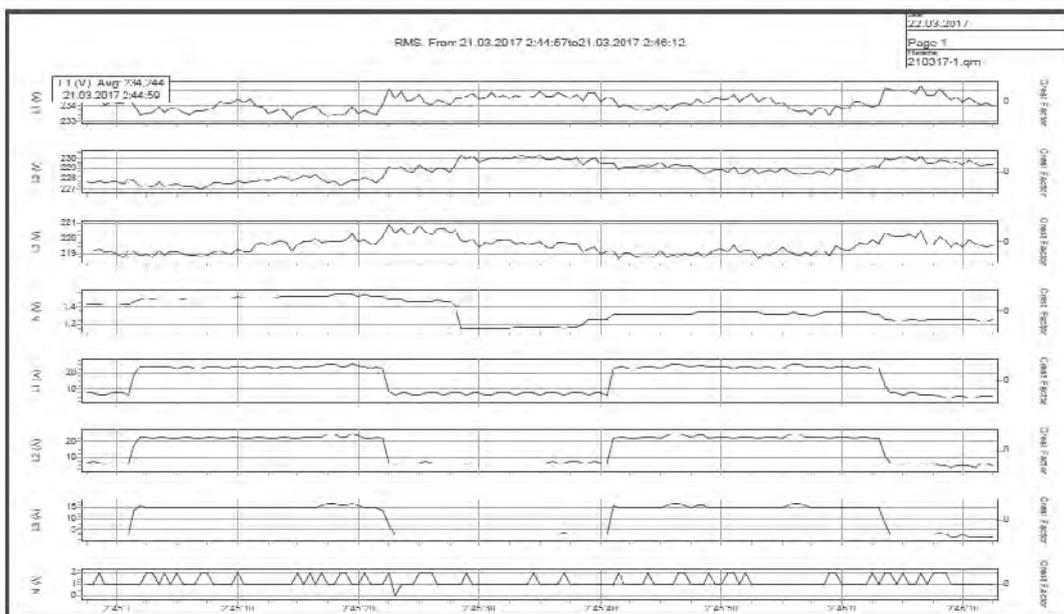
;



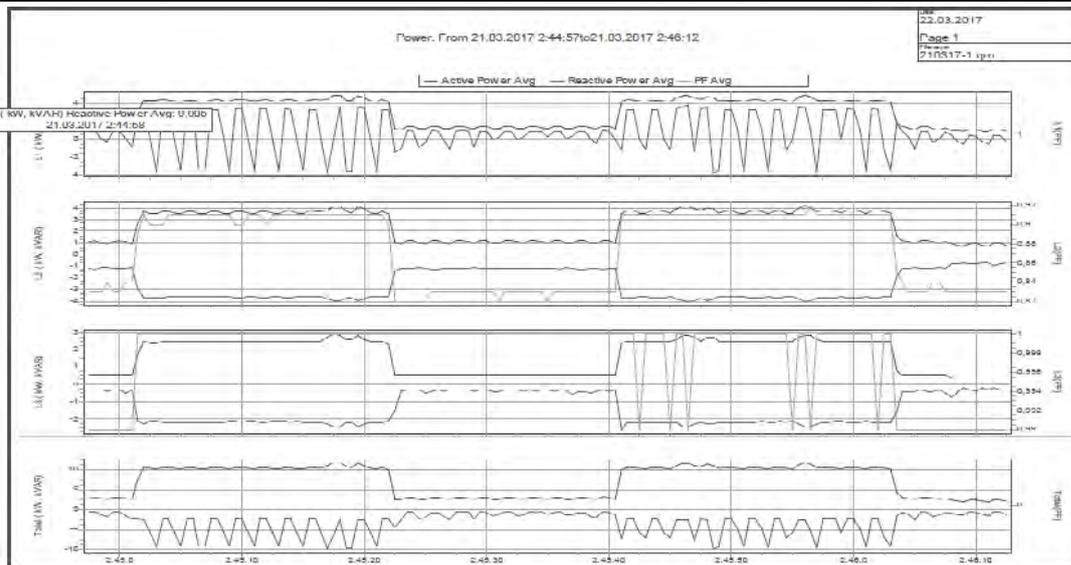
.3.



.4.



.5.



. 6.

Отклонение напряжений фаз составило фаза А – ± 3В, фаза В + 10 В, фаза С +18 В; отклонение напряжения – $U - 8\%$, что в пределах нормы; коэффициент несимметрии = 4,6, что является предельным значением. Для снижения коэффициента несимметрии предложено произвести коммутационные переключения однофазных нагрузок, что позволило достигнуть коэффициента несимметрии 1,8 – 2 %.

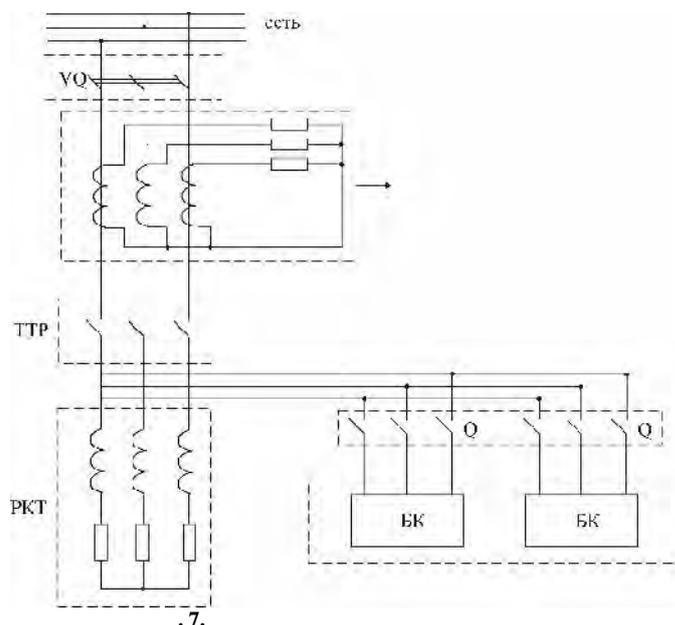
Основной причиной выхода из строя инвертора является высокое напряжения, появляющееся на инверторном блоке при провалах напряжений питающей сети. В аппаратах РКТ для проведения обследования требуется высокое, порядка 125 кВ, анодное напряжение [9]. Режим работы РКТ, (см. рис. 3) является циклическим и повторно-кратковременным, время обследования составляет от 7 до 25 минут.

Цикл обследования состоит из:

- подготовительного периода: величина тока составляет (5–8) % I – номинального значения;
- предварительного обследования: время обследования составляет 3–6 минут; величина ток может составлять (30–60) % I ;
- периода основного обследования: время обследования составляет 7–15 минут; величина ток может составлять (50–100)% I .

Во время обследований РКТ потребляет большую реактивную мощность (см. рис. 4), то есть элементы РКТ обладают большой величиной индуктивности – L . Если во время обследования происходит внезапное обесточивание индуктивности, возникает ЭДС (электродвижущей силы) самоиндукции, определяемой выражением [10]:

$$e = -L \frac{dl}{dt} .$$



. 7.

Максимальная величина ЭДС возникает в момент прохождения одним из фазных токов пикового значения синусоиды. Перенапряжение, величина которого многократно превышает номинальное значение рабочего напряжения, является причиной выхода инвертора РКТ из строя.

Выбор числа ступеней и мощности каждой ступени БК зависит от величины потребляемого тока. На рис. 8 представлена принципиальная электрическая схема силовой части устройства с двумя ступенями включения БК.

Для РКТ, работающих с графиком нагрузки (см. рис. 1), мощность каждой ступени включения БК рассчитывается по величине коэффициента мощности – $\cos \alpha$, потребленной величине активной, реактивной Q_{cm} мощности, периода в цикле обследования пациента. Выбор мощности БК осуществляется следующим образом.

Мощность БК определяется как:

$$Q \geq Q = \sqrt{S^2 - P^2}, \tag{1}$$

где $S = \frac{P}{\cos \alpha}$ – полная потребленная мощность ступени РКТ.

Зависимость между мощностью конденсатора, кВар, и емкостью, мкФ:

$$Q = 2\pi U^2 \times 10^9, \tag{2}$$

$$C = \frac{Q \times 10^9}{2\pi fU^2} \tag{3}$$

где C – емкость конденсатора;
 Q – мощность конденсатора;
 f – частота сети;
 U – напряжение сети.

Определим емкости для каждого режима работы РКТ.

Для подготовительного режима $S = \sqrt{2,2^2 + 2^2} = 3$, $\cos \alpha = 0,73$, $Q = 2$ кВар, $C = 133$ мкФ.

В табл. 3 приведены мощности и значения емкости каждой ступени.

Таблица 3

№	Наименование режима	Напряжение фазы U-B	Реактивная мощность БК фазы, кВар	Емкость БК фазы, мкФ
1	Подготовительный режим	220	2,1	131
2	Режим предварительного обследования	220	3	197
3	Режим полного обследования, (от глубины облучения)	220	10,2-50	670-3290

Время протекания переходного процесса и затухание напряжения на шине РКТ зависит от электрических параметров оборудования.

Несанкционированные отключения напряжения питания или их провал приведут к разряду БК на индуктивное и активное сопротивление РКТ. Уравнение цепи для упрощенной схемы, представленной на рис. 9, имеет вид:

$$E = IR - U \tag{4}$$

где $E = -L \frac{dI}{dt}$ (здесь L – индуктивность обмотки; $U = -\frac{1}{C} \int Idt = 0$).

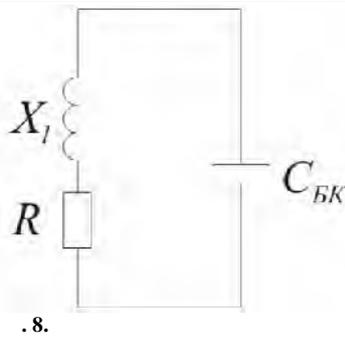
После подстановки имеем:

$$-L \frac{dI}{dt} - IR - \frac{1}{C} \int Idt = 0. \tag{5}$$

Производная от левой и правой частей уравнения представляется дифференциальным уравнением второго порядка:

$$\frac{d^2 I}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{dI}{dt} = 0. \tag{6}$$

Решение дифференциального уравнения (6) представлено формулой:

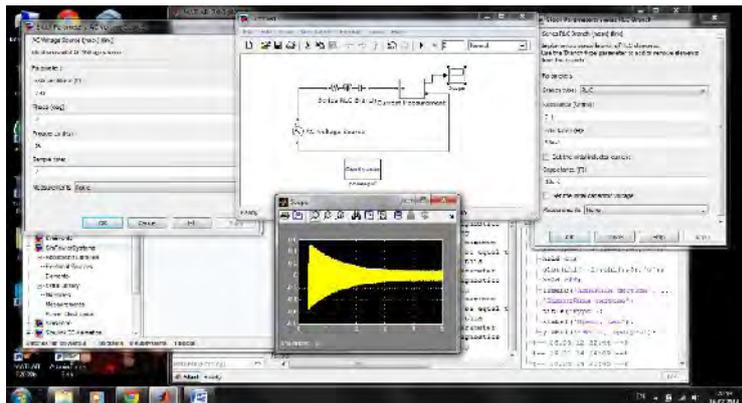


$$i = \frac{U}{2L\gamma} e^{P_1 t} + \frac{U}{2L\gamma} e^{P_2 t}, \tag{7}$$

где $\gamma = \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{CL}}$; $P_{1,2} = -\frac{R}{2L} \mp \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{L}}$.

Характер переходного процесса в цепи зависит от соотношения параметров элементов R , C , L .

При соотношении $\frac{1}{L} > \left(\frac{R}{2L}\right)^2$ переходной процесс в цепи носит аperiodический характер. Скорость изменения напряжения U зависит от величины R – активного сопротивления. На рис. 8 представлены результаты математического моделирования разряда БК для прогревочного периода.



При $\frac{1}{L} > \left(\frac{R}{2L}\right)^2$ корни характеристического выражения оказываются комплексными,

коэффициент $\gamma = \sqrt{\frac{1}{L} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}$.

Характер переходного процесса становится периодическим. На рис. 10 представлен периодический затухающий процесс разряда конденсатора, который соответствует предварительному и полному обследованиям.

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}}. \tag{8}$$

В табл. 4 Приведены результаты расчета времени затухания напряжения на шинах РКТ для различных значений $\cos \phi$. Расчет проведен для случая 100 % загрузки РКТ; потребляемая активная мощность равна 51,1 кВт, $\cos \phi = 0,73$, индуктивность $L = 0,03$ Гн, $R = 3,26$ Ом.

№/№	Значение $\cos \alpha$	Мощность БК, кВар	Емкость БК, мкф	Время затухания, мс
1	0,9	46,0	3027,0	70,0
2	1,0	47,84	3147,0	71,8
3	1,07	55,0	3619,0	79,3
4	1,1	56,3	3705,0	83,0
5	1,2	61,44	4042,2	86,0
6	1,25	64,1	4211,4	89,1

При 50 % загрузки РКТ, когда активная мощность равна 25 кВт, время затухания составляет 46 мс.

Подключение БК параллельно РКТ в режимах обследования позволяет компенсировать потребленную реактивную мощность и обеспечить задержку снижения напряжения от 45 мс до 90 мс. Для диагностирования причины снижения напряжения достаточно 5 мс.

Измерения температурных параметров и величин токов, протекающих в болтовых соединениях, позволяют определить начало ослабления его контакта [11, 12].

Постоянная нагрева болтового соединения является конструктивной константой, а ее изменение – причиной ослабления контакта и увеличения переходного сопротивления $R_{\text{пре}}$ или увеличении силы тока, протекающего в соединении.

Для расчета температуры токоведущего соединения при изменяющейся токовой нагрузке используется тепловая модель, которая описывается уравнением нагрева для однородного тела:

$$\Delta P dt = \alpha F \Delta \theta dt + c G d\theta \quad (9)$$

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

dt – время протекания процесса;

α – коэффициент теплопередачи;

F – площадь поверхности болтового соединения;

c – удельная теплоемкость материала, из которого выполнено болтовое соединение;

G – масса болтового соединения;

$\Delta \theta$ – превышение температуры болтового соединения над температурой окружающей среды.

Решением уравнения (9) при неизменной силе тока, протекающего в болтовом соединении, является:

$$\theta = \theta_y - (\theta_y - \theta_0) e^{-t/\tau} \quad (10)$$

где θ_y – температура болтового соединения в установившемся режиме;

θ_0 – температура болтового соединения в начале режима;

τ – постоянная нагрева болтового соединения.

Если температура болтового соединения и окружающей среды одинаковы, то уравнение нагрева имеет вид:

$$\theta = \theta_y (1 - e^{-t/\tau}) \quad (11)$$

Постоянная нагрева τ представляет собой время, в течении которого болтовое соединение с теплопроводностью s и массой G нагревается до температуры θ_y при отсутствии рассеяния теплоты с его поверхности. Постоянная нагрева является конструктивной константой данного болтового соединения, которую можно определить по справочным данным и параметрам болтового соединения, как:

$$\tau = \frac{c G \Delta \theta}{\Delta P} \quad \text{или} \quad \tau = \frac{c G \Delta \theta}{I^2 R} \quad (12)$$

где $R_c = R + R_{\text{пре}}$ – суммарное сопротивление контактов и переходного сопротивления соединения.

Решением уравнения для определения времени нагрева до температуры θ_y является выражение:

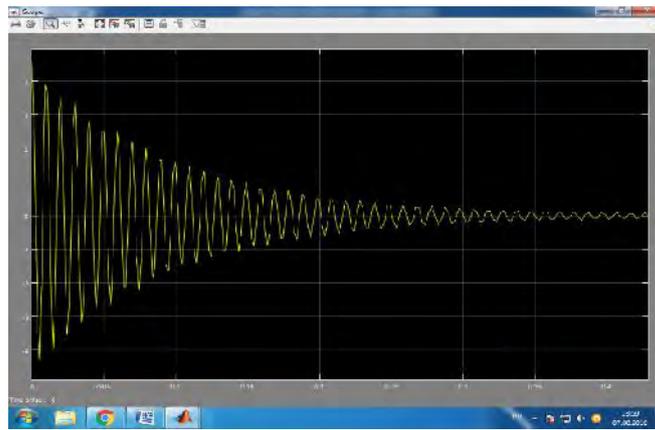
$$t = \tau \ln \frac{\theta_y - \theta_0}{\theta_y - \theta} \quad (13)$$

Прогнозирование времени развития аварий, произошедших по причине ослабления контактного соединения, основано на знании величины постоянной нагрева исправного соединения, определяемой выражением (12) и величины тока, протекающего в соединении. Величина температуры, до которой нагреется болтовое соединение, определяется выражением (10). Полученная величина температуры сравнивается с измеренной температурой данного болтового соединения. По разности температур определяется исправность болтового соединения. Если постоянная нагрева изменилась, вычисляется прогнозируемое время достижения соединения критической температуры, то есть время развития аварии.

Полученные данные о состоянии питающей сети и токоведущих соединений, как до включения РКТ, так и вовремя его работы, позволяют расширить функции врача, проводящего обследования,

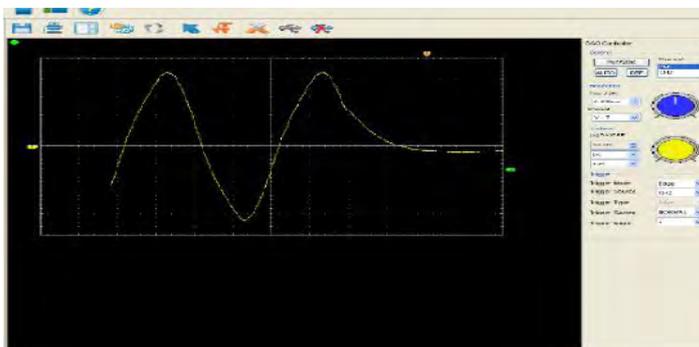
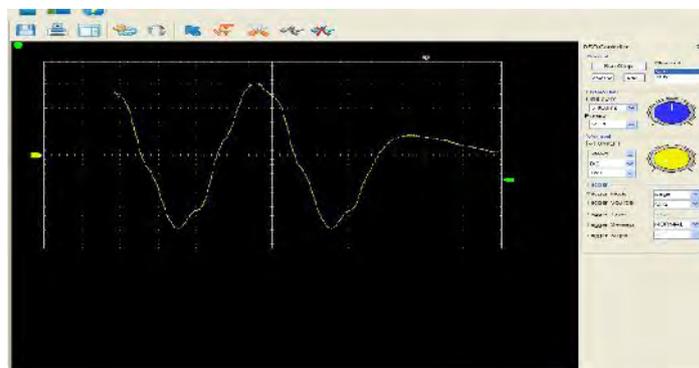
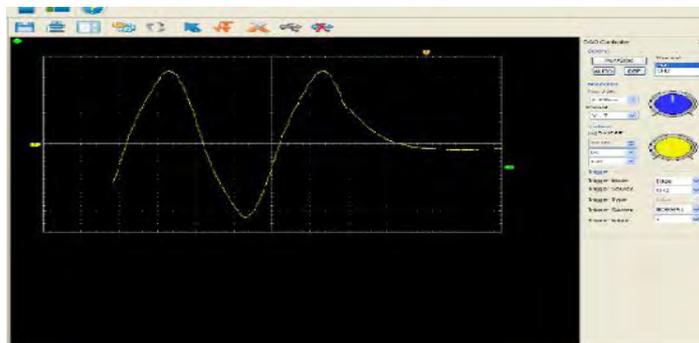
своевременно принимать решения о проведении обследования и знать причины, приведшие к аварийной ситуации.

На рис. 12 приведена блок-схема алгоритма работы устройства комплексной защиты РКТ.



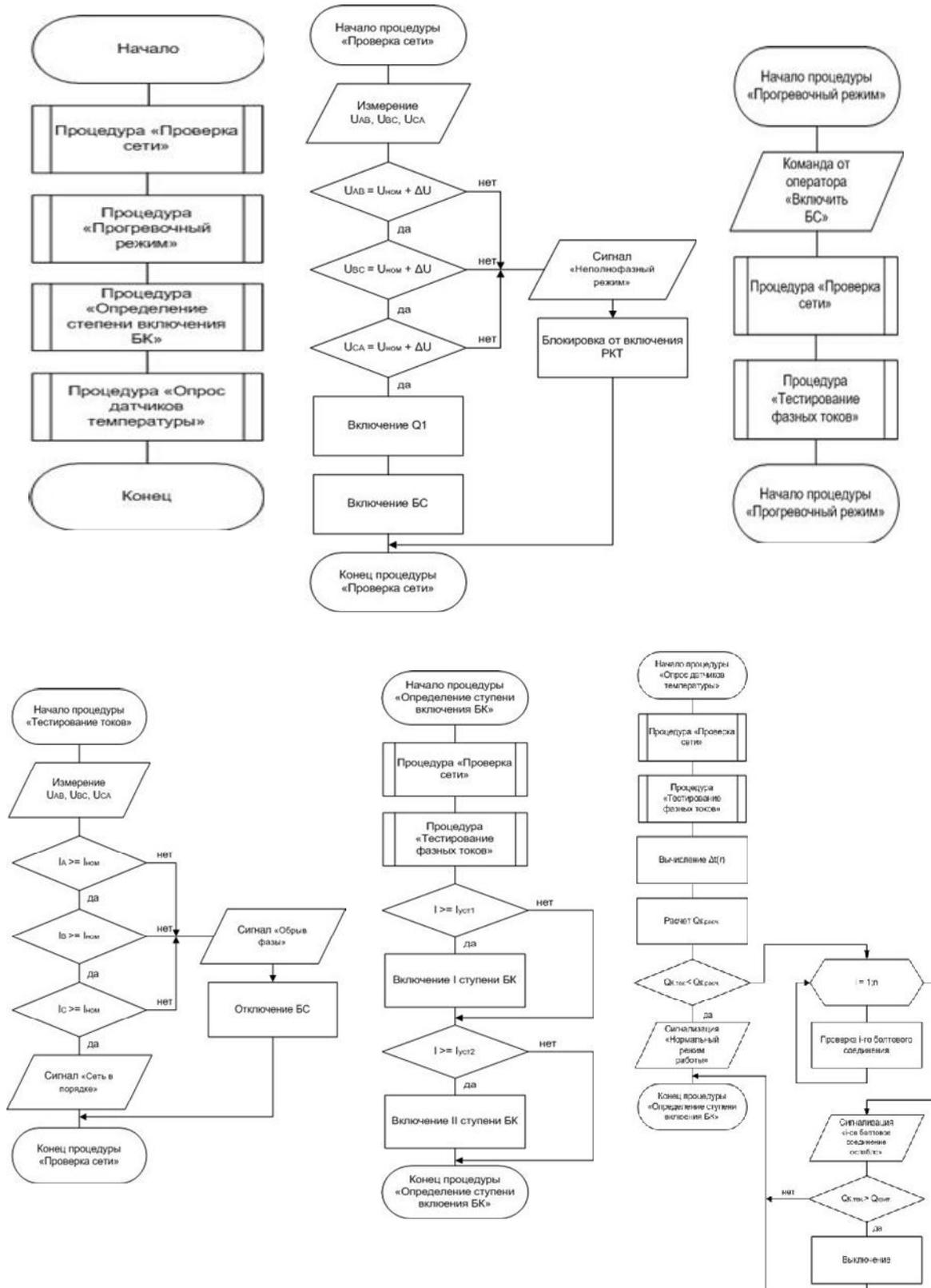
. 10.

На физической модели проведено моделирование процесса разряда конденсаторов для различных значений $\cos \phi$ (рис. 12)



. 11. $\cos \phi = -0,82$ () ; () , $\cos \phi = 1$ ()

Расчет времени протекания процесса затухания , определяется согласно источнику [10] выражением:



. 13. -

1. Неполнофазные режимы напряжений и их, провалы, обрывы в токоведущих соединения являются причинами возникновения внутренних перенапряжений РКТ, приводящих к поломке инвертора.
2. Мониторинг напряжений питающей сети, токов нагрузки и температур токоведущих соединений позволяет диагностировать причины внезапного снижения напряжения на шинах РКТ.
3. Применение параллельно включенных РКТ батарей конденсаторов и твердотельных выключателей позволяет получить временную задержку падения напряжения на клеммах питания РКТ до 90 мс, провести диагностику и безаварийное отключение РКТ при прохождении фазового тока нулевого значения.

4. Одновременный контроль токов нагрузки и температур болтовых соединений позволяет определить момент ослабления контакта и прогнозировать время достижения критического значения температуры контакта.

5. Получение врачом достоверной информации о состоянии элементов системы электроснабжения оборудования позволяет правильно принять решение по алгоритму обследования больного.

1. Неисправности в рентгеновских компьютерных томографах [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://ags-etalgroupp.ru/publ/rentgenotekhnika/obnaruzhenie_defektov_remont_rentgenovskikh_apparatorov/26-1-0-400.

2. Системы электроснабжения медицинских помещений [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://energolider.com/ua/articla-show\139.html/>.

3. Пищур А. Коммутационное оборудование / А. Пищур, С. Ефимовых // Новости электротехники. – № 5 (77). – С. 17–24.

4. Кривонос В. Е. Критерий диагностики винтовых соединений в ультразвуковой томографической аппаратуре / В. Е. Кривонос, С. М. Злепко // Вестник Хмельницкого национального университета. – 2017. – № 1. – С. 16–22.

5. Патент RU № 2408120, Н02Н5/04, 2009.

6. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей : утв. 25.07.06 № 258 / Мин-во топлива и энергетики Украины. – Х. : Издательство: «Индустрия», 2007. – 288 с.

7. ГОСТ 13109-97 «Нормы качества электроэнергии» и европейски 1 стандарт EN50160 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://lcert.ru/novosti/vveden-novyuy-standart-kachestva-elektroenergii-gost-r-54149>.

8. Провалы напряжения [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://rza.org.ua/glossary/read/Proval-naprjazhenija.htm>

9. Устройство рентгеновского компьютерного томографа [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://rudocs.exdat.com/docs/index-67135.html>.

10. Электротехника / [Ю. М. Борисов и др.]. – М. : Электроатомиздат, 1985. – 552 с.

11. Патент України № 107749 Спосіб контролю за станом болтових з'єднань електрообладнання, що працює зі змінним навантаженням / Кривонос В. Э. – Опубл. 10.02.2015.

References

1. Neyspravnosty v renthenovskyykh kompiuternyykh tomografakh [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupa : http://agsetalgroupp.ru/publ/rentgenotekhnika/obnaruzhenie_defektov_remont_rentgenovskikh_apparatorov/26-1-0-400.

2. Systemy elektrosnabzheniya medytsynskyykh pomeshcheniy [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupa : <http://energolider.com/ua/articla-show\139.html/>.

3. Pyshchur A. Kommutatsyonnoe oborudovanye / A. Pyshchur, S. Efyvovykh // Novosty elektrotekhniky. – # 5 (77). – S. 17–24.

4. Kryvonosov V. E. Kryteryi dyahnostyky vyntovykh soedyneni v ultrazvukovoi tomografycheskoi apparature / V. E. Kryvonosov, S. M. Zlepko // Herald of Khmelnytsky National University. – 2017. – # 1. – S. 16–22.

5. Patent RU # 2408120, N02N5/04, 2009.

6. Pravyla tekhnicheskoi ekspluatatsyy elektroustanovok potrebytelei : utv. 25.07.06 # 258 / Myn-vo toplyva y enerhetyky Ukrainy. – X. : Yzdatelstvo: «Yndustryia», 2007. – 288 s.

7. HOST 13109-97 «Normy kachestva elektroenerhyu» y evropeisky 1 standart EN50160 [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupa : <https://lcert.ru/novosti/vveden-novyuy-standart-kachestva-elektroenergii-gost-r-54149>.

8. Provaly napriazheniya [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupa : <http://rza.org.ua/glossary/read/Proval-naprjazhenija.htm>

9. Ustroistvo renthenovskoho kompiuternoho tomografa [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupa : <http://rudocs.exdat.com/docs/index-67135.html>.

10. Elektrotekhnika / [Yu. M. Borysov y dr.]. – M. : Elektroatomyzdat, 1985. – 552 s.

11. Patent Ukrainy # 107749 Sposib kontroliu za stanom boltovykh ziednan elektroobladnannia, shcho pratsiuie zi zminnym navantazhenniam / Kryvonosov V. Э. – Opubl. 10.02.2015.

Рецензія/Peer review : 23.09.2017 р. Надрукована/Printed : 02.11.2017 р.

Рецензент: стаття прорецензована редакційною колегією