

УДК 620.179

Пиротти Е.Л.

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»

Зленко С.М.

Винницкий национальный технический университет

Кривоносов В.Е.

Приазовский государственный технический университет

КРИТЕРИЙ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИСТЕМ ЗАЩИТЫ МЕДИЦИНСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

В работе рассмотрены виды и системы защиты медицинского оборудования, работающего с такими показателями качества напряжения, которые отличаются от нормируемых ГОСТ 13109-97 величинами. Критерием выбора системы защиты медицинского оборудования являются множество состоящих из воздействующих факторов на оборудование видов и зон действия защит, стоимость элементов системы защиты; определяющим является минимизация предотвращенного ущерба. Предотвращенный ущерб является пересечением множеств, состоящих из видов и зон действия защит и стоимости элементов системы защиты. Оценкой эффективности работы системы защиты является срок ее окупаемости.

Ключевые слова: отклонения и провалы напряжения, ущерб, магнитно-резонансный томограф, рентгеновский компьютерный томограф, критерий эффективности, релейная защита.

Постановка проблемы. Надежная и безопасная работа диагностического медицинского оборудования является актуальной задачей, поскольку, перерыв в работе медицинского оборудования, вызванный аварийными и предаварийными режимами, может поставить под угрозу человеческую жизнь и привести к крупным материальным затратам.

Медицинская техника очень чувствительна к качеству напряжения в сети. Нестабильность, коммутационные помехи, паразитные напряжения и пр. могут привести к некорректной работе, сбоям и поломке дорогостоящего оборудования, приборов и систем, например, компьютерных рентгеновских томографов (далее – РКТ), магнитных резонансных томографов (далее – МРТ). Выбор и обоснования оснащения дорогостоящего медицинского оборудования системами управления, диагностики и защиты от внештатных режимов является актуальной задачей.

Анализ последних исследований и публикаций. В соответствии с законодательством [1; 3], во всех больницах должна быть установлена «защита» медицинского электрооборудования от внештатных режимов электропитания. В зависи-

мости от мер, которые применяются для защиты медицинского оборудования и больных от поражения электрическим током, медицинские помещения можно разделить на три группы.

Группа 0 (Гр. 0) – медицинские помещения, в которых не используются контактирующие проводящие части и приборы, т.е. проводящие части медицинского оборудования, которые должны находиться в физическом контакте с пациентом (касаться его или вводиться внутрь). Защитные меры в помещениях Гр. 0: установка автоматического отключения медоборудования при первичном пробое изоляции, установка автоматических выключателей (пускателей), обеспечивающих токовую отсечку, максимальную токовую и тепловую защиты. Эти системы защит [2] успешно справляются с выполнением данных требований.

Группа 1 (Гр. 1) – помещения, в которых контактирующие части и приборы применяются наружно или внутренне, но нарушение электропитания не может привести к серьезному ущербу для пациента (например, физиотерапевтические и гидротерапевтические кабинеты). В помещениях Гр. 1 происходит автоматическое отключение в случае первого КЗ на открытые

токопроводящие части или при регистрации токов утечки, а также при перебоях электропитания.

Защитные меры в помещениях Гр. 1: использование элементов электрической схемы с двойной изоляцией и установка системы контроля изоляции; установка устройства защитного отключения (далее – УЗО) с номинальным дифференциальным током срабатывания не более 30 мА; установка систем контроля и защиты безопасного сверхнизкого напряжения (далее – БСНН). Использование дополнительных защит, таких как уравнивание потенциалов и аварийное электроснабжение.

Группа 2 (Гр. 2) – помещения, в которых контактирующие части и приборы применяются для жизненно важных лечебных процедур, но при этом первичная неисправность в цепи питания не должна приводить к отказу аппаратуры жизнеобеспечения (операционные и пр.).

Нормативные средства защиты, установленные в помещениях медицинских учреждений, не всегда защищают электрооборудование и больных от непредвиденно возникших аварийных ситуаций. Так, РКТ настолько чувствительны к провалам напряжения, что для необратимых сбоев в их работе достаточно доли секунды [4; 5]. Локальные перегревы изоляции, причинами которых являются несимметричные напряжения в сети, повышенная запыленность участка поверхности изоляции и т.д. способствуют её ускоренному старению и возникновению пробоя [6]. Отсутствие диагностики причин тепловой перегрузки медоборудования приводит к ложным отключениям, простоям, недообследования больного и в конечном итоге – к материальному ущербу [7]. Отсутствие контроля целостности токовых цепей и режимов напряжений в питающей трехфазной сети является причиной работы оборудования в неполнофазном режиме, его перегрева и поломки [8].

Виды защит согласно [2], делят на основные, резервные и дополнительные (минимальные, максимальные и специальные).

Основными требованиями к применяемым системам защит являются обеспечения быстродействия, селективности, чувствительности и надежности. Однако выбор системы защиты РКТ и МРТ (по критерию обеспечения быстродействия, селективности, чувствительности и надежности) не всегда эффективен и корректен. Критерием выбора и оценки эффективности работы защиты трехфазных РКТ и МРТ целесообразно использовать потенциально предотвращенный ущерб.

Применение критерия «предотвращенный ущерб» является более логичным и целесообраз-

ным, потому что системы и средства защиты, имеющие различные функции, принцип действия и область применения, имеют различную стоимость.

Постановление задания. Обоснование критерия оценки эффективности работы систем защиты медоборудования.

Изложение основного материала исследования. Решения в области обеспечения безопасности и минимизации ущерба, реализуемые в реально функционирующих и вновь созданных системах защиты медицинского оборудования (далее – МО) – требуют выбора показателей эффективности, анализа стоимости, оценки последствий и определения критериев принятия решений. Когда же наступает реальная необходимость выбора средств защиты МО, то ситуация не всегда оказывается вполне однозначной и определенной [9].

Одним из апробированных и хорошо себя зарекомендовавших вариантов является многоуровневая критериальная оценка выбора системы защиты МО и оценки эффективности ее применения.

Первый (верхний) уровень системы оценки выбора и эффективности предлагает использовать основным критерием эффективности математическое ожидание множества, состоящее из стоимости предотвращенных ущербов $Y = f(y_i)$, количественной оценкой которого является величина стоимости предотвращенного ущерба.

Второй уровень оценки системы выбора и эффективности системы защиты МО использует множество, состоящее из стоимостных показателей элементной базы и систем защиты МО $N = f(C_i)$.

Третий уровень системы оценки выбора и эффективности это множество $B = f(b_i)$, непосредственно определяющих свойства проектируемой системы защиты МО. Множество B определяет способность системы защиты к выполнению максимально необходимого перечня действий, то есть её функциональную полноту и оперативность – способность системы решать поставленные задачи за установленные промежутки времени. Третий уровень оценки характеризуется тем, что на нем формируются показатели, оценивающие любое средство защиты МО, а именно: показатели надежности, быстродействия, селективности, чувствительности и другие.

На рис. 1 приведена схема взаимосвязи уровней защиты МО и воздействующих факторов.

Стоимостный показатель элементов системы защиты МО – $C = f(C_i)$ зависит от множества

$D=f(d_i)$, состоящего из воздействующих факторов, к которым относятся токовая нагрузка d_I , уровни напряжения d_U , температурные показатели МО и частей схемы электроснабжения, уровни сопротивления изоляции d_R , и др.

Стоимостный показатель системы защиты МО определяется выражением:

$$C = \sum_{i=1}^n c_i, \quad (1)$$

где: n – количество дополнительных элементов, блоков и средств системы защиты МО, расширяющих функциональные возможности и зоны

действия системы; c_i – единичная стоимость элементов (блоков, средств и т.д.) определяемая как:

$$C_i = D_i^m \cap B_i^k, \quad (2)$$

где: m – число воздействующих факторов на МО; k – число элементов средств защиты МО.

Полный предотвращенный ущерб Y определяется выражением

$$Y = \sum_{i=1}^s y_i, \quad (3)$$

где s – количество учитываемых единичных ущербов.

y_i – единичный предотвращенный ущерб определяется выражением [10]

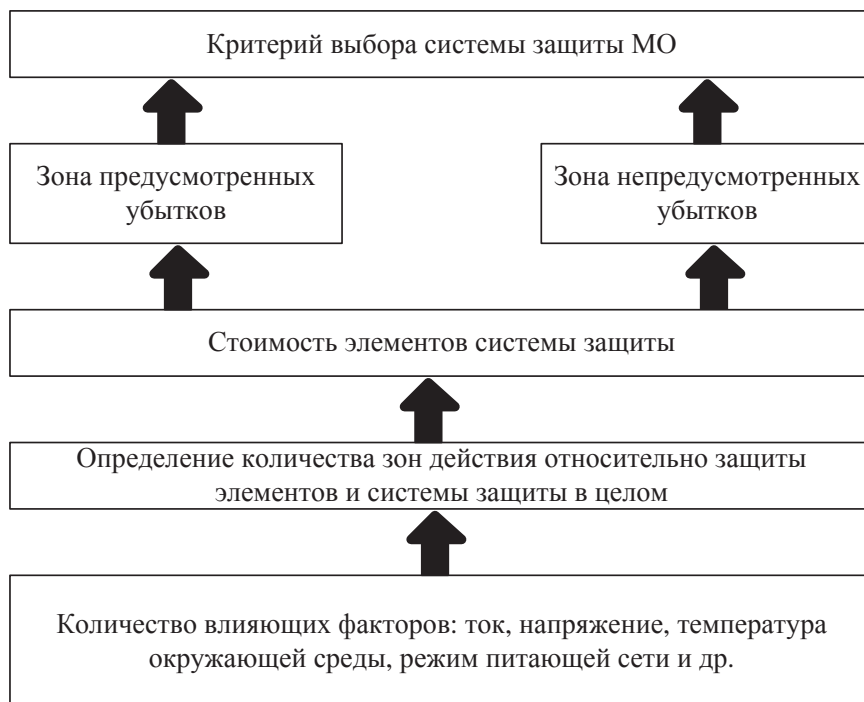


Рис. 1. Схема взаимосвязи уровней защиты МО и воздействующих факторов

Таблица 1

Укрупненные стоимостные показатели ущербов

№	Вид повреждения	Время действия, час/год	Единичная стоимость ущерба, гр/час	Стоимость ущерба, гр/час
1	Отсутствие напряжения	20-40	500,0	15000,0
2	Неполнофазные	12-15	300,0 гр без повреж. 12000,0 с повреж. эл.	3600,0-4500,00 12000,0
3	Ослабление болтовых соединений	5-7	300,0 гр без повреж. 2000,0 с повреж. эл.	1800,0 гр – 12000,0 гр
4	Тепловое воздействие, сокращение срока службы изоляции и ложные срабатывания отключ. и простой МО	15-20	800,0	12000,0 – 15000,0
5	Пробой изоляции	0,1	6400,00	6400,00
6	Отклонения напряжения и несимметричные режимы	800-1000	200,00	16000,0-20000,0
7	Провал напряжения длительностью 0,01 с.	до 10 раз/год.		до 500000,0

$$y_i = C_i^n \cap D_i^m \cap B_i^k, \quad (4)$$

Математическая модель предотвращенного ущерба имеет такой вид:

$$Y = \sum_{i=0}^n C_i^n \cap D_i^m \cap B_i^k. \quad (5)$$

Ущерб, причинённый некорректным использованием систем защиты МО, является многофакторной функцией, зависящей от множества D , состоящего из воздействующих на МО факторов множества B – состоящего из средств и элементов входящих в систему защиты и множества C , состоящего из единичной стоимости средств защиты, определяющих область и характер действия при аварийных ситуациях.

В таблице 1 приведены ориентировочные укрупненные стоимости ущербов при различных аварийных ситуациях.

Приведенные в табл. 1 данные являются ориентировочными и во многом зависят от режима работы питающей сети, остаточного ресурса элементов схемы электроснабжения медицинского учреждения, от квалификации обслуживающего персонала и др.

Для обеспечения надежной работы РКТ и МРТ также используют системы и средства защиты, наименование и стоимость которых приведены в табл. 2.

Критерием эффективности работы системы защиты можно считать коэффициент окупаемости $K_{ок}$.

$$K_{ок} = \frac{\sum_{i=1}^n C_i}{\sum_{i=1}^s Y_i}. \quad (7)$$

Числовой диапазон изменения $K_{ок}$ может составлять от 1 года до 7 лет. Чем меньше коэффициент окупаемости $K_{ок}$, тем эффективней средства защиты.

Опыт эксплуатации и ремонтов МО показывает, что однофазное медицинское оборудование, мощность потребления которого составляет не более 10 кВт, и к которому относятся МРТ; литотриптеры, физиотерапевтические приборы и другое оборудование успешно работает с нормированными средствами защиты, а для исключения влияния некачественного напряжения сети, используют источники бесперебойного питания (ИБП).

Оценим эффективность работы ИБП как дополнительной системы защиты.

Ущерб от дополнительного простоя МРТ определится как:

$$Y_{прое} = T \cdot \tau_{прое}, \quad (8)$$

где: T – тариф стоимости часа услуг. Для МРТ (на сегодняшний день) составляет 540 грн/час; $\tau_{прое}$ – время простоя, вызванное отклонением напряжения выше нормируемой величины; увеличением времени обследования больного при снижении напряжения в сети; наличием высших гармонических составляющих и простоях при аварийном отключении. Математическое ожи-

Таблица 2

Виды и стоимости защит

№	Наименование системы защиты	Причины срабатывания и действия защиты	Вид дефекта	Элементы защиты	Стоимость тыс. грн
1	Токовая отсечка	Внутренние короткие замыкания. Мгновенное отключение от сети.	Внутренние поломки МО, пробой кабеля, автоматов ключ.	Установка автоматов, пускателей, токовых реле	1,5 – 3,5
2	Максимально токовая защита	Токовая перегрузка и отключение от сети	Внутренние поломки МО, повышение напряжения сети	Установка токовых реле, трансформаторов тока	2,5 – 4,2
3	Отклонения напряжений и не симметричные режимы	Перегрев МО, сигнализация и отключение от сети	Режимы в сети	Установка стабилизаторов напряжения	4,0 – 35
4	Тепловая защита	Перегрев МО	Внутренние повреждения рем. сети поломка механической части МО	Установка тепловых реле	1,2 – 1,6
5	Защита от провалов напряжения	Несанкционированное отключение. Переключение включения резервного питания	Режимы сети	Установка: источника бесперебойного питания; специальных средств защиты	

Сравнительный анализ систем защиты

№	Вид показателей работы систем	Нормативно устанавливаемые системы защит в медпомещениях ГР(0)	МСУДЗМО
1	Виды защит	Максимально токовая и тепловая защита, токовая отсечка	1. Максимально-токовая защита. 2. Токовая отсечка. 3. Температурная защита. 4. Контроль неполнофазных режимов сети. 5. Контроль токовых линий. 6. Контроль болтовых соединений 7. Контроль диэлектрической изоляции.
2	Возможность диагностирования причин аварийных режимов	Отсутствует	1. Диагностика начального момента ослабления болтового соединения 2. Диагностика отключений и провалов напряжения. 3. Диагностика причин температурной перегрузки РКТ. 4. Диагностика целостности токовых цепей. 5. Диагностика состояния изоляции.
3	Действие защит	Отключение МО от сети	1. Наличие предубедительной сигнализации о начале аварийного режима. 2. Диагностика выявления причины аварии с последующим безаварийным отключением
4	Ожидаемый годовой ущерб грн./год	От 30 тыс. грн. – до 500,0 тыс. грн. / год.	До 8 тыс. грн./год.

дание $\tau_{\text{прое}}$ составляет (24,8-36,0) час/год. $Y_{\text{прое}} = 540 \times 30 = 16200,0$ грн/год.

Превышение температуры изоляции при отключении напряжения $\Delta U = 8,5\%$ и коэффициенте несимметрии $K_{2U} = 3,2\%$ сокращает срок эксплуатации МРТ на 2,65%. Годовой ущерб от сокращения срока эксплуатации МРТ – $Y_{\text{амор}}$, при стоимости МРТ = 7000000 грн. и сроке окупаемости 12 лет составляет $Y_{\text{амор}} = \frac{7000000}{12} \cdot 0,0265 = 15458,3$ грн/год.

Суммарный ущерб $Y = 16200,0 + 15458,3 = 31658,3$ грн/год.

При стоимости ИБП (модель MST-12 Riello-10,8 – 161662,0 грн) получаем коэффициент окупаемости $K_{\text{ок}} = \frac{161662,0}{31658,3} = 5,1$ год.

РКТ работают на трехфазной системе питания, имеют мощность от 35 кВт до 120 кВт и являются чувствительными к провалам напряжения. Несанкционированные отключения, обрывы токоведущих частей, коммутационные переключения в питающей сети в одном из десяти случаев приводит к появлению внутренних перенапряжений и выходу из строя инвертора, стоимость которого составляет 20-35% от стоимости РКТ.

Установка ИБП не решает проблемы защиты РКТ от провалов напряжения в питающей сети.

Время переключения резервного питания в ИБП составляет от 0,005 до 0,03 с. Для защиты РКТ разработана многоуровневая система управления, диагностики и защиты РКТ (МСУДЗМО) [13], которая позволяет проводить полную диагностику режимов питающей сети, токовых цепей болтовых соединений, диагностировать причины температурной перегрузки и контролировать уровень износа диэлектрической изоляции. Ежегодный ущерб при работе РКТ от сети с некачественным напряжением согласно [12] может составить от 30000,0 грн. до 300000,0 грн., в случае выхода из строя инвертора. Стоимость МСУДЗМО составляет 78380,0 грн.

Коэффициент окупаемости

$$K_{\text{ок}} = \frac{78380,0}{30000,0} = 2,6 \text{ год (минимальный).}$$

В табл. 3 приведены результаты сравнительного анализа эффективности использования традиционных (нормативных) средств защиты РКТ и разработанной системы МСУДЗМО.

Выводы. Предотвращенный ущерб является пересечением множеств, состоящих из видов и зон действия защит и стоимости элементов системы защиты.

Оценкой эффективности работы системы защиты является срок ее окупаемости.

Список літератури:

1. ГОСТ 50571.28-2006 Электроустановки зданий. Часть 7-710. Требования к специальным электроустановкам. Электроустановки медицинских помещений. Москва, 2007. 21 с.
2. Чернобровов Н.В. Релейная защита. Изд.5, М., «Энергия». 1974. 660 с.
3. Системы электроснабжения медицинских помещений. URL: <http://energolider.com/ua/articla-show\139.html> (дата звернення: 13.03.2018).
4. European guidelines on quality criteria for computed tomography, EUR 16262. European commission, 1999.
5. Kalender W.A. Computed tomography: fundamentals, system technology, image quality, applications. Publicis Corporate Publishing, Erlangen, second edition, 2005, 304 p.
6. Старение изоляции под действием тепловых, климатических и механических факторов. URL: <http://refleader.ru/otradyuysjge.html> (дата звернення: 13.03.2018).
7. American College of Radiology (ACR) technical standard for diagnostic medical physics performance monitoring of computed tomography (CT) equipment, 2002, revised version.
8. Самойленко И.А. Классификация и систематизация видов ущерба от низкого качества электроэнергии. Экономика Крыма №2. 2010. – С. 109-115.
9. Воронин В.А., Лебедев Г.М. Об экономическом ущербе от снижения качества электроэнергии и источника его возникновения. Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2016. № 3, С. 79-86.
10. Сигорский В. П.. Математический аппарат инженера. Техніка. Київ, 1975. 768 с.
11. Кривонос В.Е., Злепко С.М., Павлов С.В., Азархов О.Ю., Барановський Д.М.. Комплексная защита компьютерных рентгеновских томографов от нестабильности и провалов питающего напряжения. Вісник ХНУ Серія «Технічні науки». № 5, 2017. С. 192-202.
12. Кривонос В.Е., Коваль Л. Г., Бачинский М. В., Балалаева А.Ю., Барановский Д.М. Влияние качества электроэнергии на работу диагностического медицинского оборудования. Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія № 1(4), 2018. С. 54-63.
13. Пристрій захисту рентгеновського комп'ютерного томографа пат. 120117 Україна: МПКН02Н 5\04. Кривонос В.Е, Злепко С.М., Азархов О.Ю., Коваль Л.Г, № 201793730 опубл. 25.10.2017, Бюл. № 20. 7 с.

КРИТЕРІЙ ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМ ЗАХИСТУ МЕДИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

У роботі розглянуто види і системи захисту медичного обладнання, що працюють із показниками якості напруги, відмінними від нормованих ГОСТ 13109-97 величинами. Критерієм вибору системи захисту медичного обладнання є безліч складних факторів, що впливають на обладнання, види і зони дії захистів, вартість елементів системи захисту і визначальним є мінімізація запобігання шкоди. Запобігання шкоди є перетином множин, що складаються з видів і зон дії захистів і вартості елементів системи захисту. Оцінкою ефективності роботи системи захисту є термін її окупності.

Ключові слова: відхилення і провали напруги, збиток, магнітно-резонансний томограф, рентгеновський комп'ютерний томограф, критерій ефективності, релейний захист.

CRITERION FOR ASSESSING THE CHOICE AND USE OF MEDICAL EQUIPMENT PROTECTION SYSTEMS

In the work, the types and systems of protection of medical equipment that work with the voltage quality indicators other than those standardized by GOST 13109-97 are considered. The criterion for choosing a system for the protection of medical equipment, apart from the safety of patients, is the set consisting of the factors affecting the equipment, the types and zones of protection, the cost of the elements of the protection system, and the minimization of the prevented damage is determinant. Prevented damage is the intersection of sets consisting of the types and zones of protection and the cost of the elements of the protection system. Evaluation of the effectiveness of the protection system is its payback period.

Key words: deviations and voltage failures, damage, magnetic resonance tomograph, X-ray computer tomograph, efficiency criterion, relay protection.