

И.С. ВАРШАМОВА, м.н.с, НТУ "ХПИ", Харьков
Е.Г. КОРОЛЬ, ассистент, НТУ "ХПИ", Харьков
Н.В. КРЮКОВА, ассистент, НТУ "ХПИ", Харьков
Н.А. ЛЕЛЮК, стаж. преподаватель, НТУ "ХПИ", Харьков
В.В. ЛИТВИНЕНКО, ассистент, НТУ "ХПИ", Харьков
В.С. ЛУПИКОВ, д-р техн. наук, проф., зав. каф., НТУ "ХПИ",
Харьков
Е.А. СЕДОВА, ст. преподаватель, НТУ "ХПИ", Харьков

МЕТОД МУЛЬТИГРАДИЕНТНОГО НАПРАВЛЕННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ИЛИ НАГРЕВА МАЛЫХ ОБЪЕКТОВ

Наведено опис відомого способу мультиградієнтного охолодження або нагрівання малих об'єктів. Спосіб реалізовано у вигляді пристроїв, що забезпечують створення змінного температурного градієнта в робочій області з розташованим усередині малим об'єктом, і переміщення об'єкту з керованою швидкістю в горизонтальному або вертикальному напрямках. Спосіб може бути використаний для тонкого регулювання термодинамічних параметрів малих об'єктів при їх охолодженні.

Приводится описание известного способа мультиградиентного направленного охлаждения или нагревания малых объектов. Способ реализован в виде устройств, обеспечивающих создание переменного температурного градиента в рабочей области с расположенным внутри малым объектом, и перемещение объекта с управляемой скоростью в горизонтальном или вертикальном направлениях. Способ может быть использован для тонкого регулирования термодинамических параметров малых объектов при их охлаждении.

Введение. В настоящее время наблюдается резкое увеличение номенклатуры электрических аппаратов защиты, в частности, автоматическим выключателям, работающим в режиме ожидания и срабатывающим в аварийном режиме. Это связано, в основном, с расширением энергонасыщенности технических и бытовых объектов, а также применением современных технологий в электроаппаратостроении. Однако, такая ключевая проблема, как энергосбережение, практически не влияет на характеристики таких аппаратов. По сути, действует принцип: если покупают, то усложнение конструкции не требуется. То есть, выбор конструктивных элементов электрического аппарата осуществляется с "запасом", обеспечивающим тепловую стойкость аппарата. В результате существующие технологии проектирования электрических

аппаратов не стремятся минимизировать энергопотребление самих аппаратов и оптимизировать затраты энергии на их производство. В работе [1] сформулирована задача поиска метода сверхбыстрого охлаждения контактов электрических аппаратов защиты на период аварийного режима. При этом электрические контакты автоматического выключателя рассматриваются как малые объекты, которые необходимо быстро охладить. Поиску таких методов сверхбыстрого охлаждения посвящены работы [1, 2]. В данной работе рассматривается известный метод [3], который применяется для тонкого регулирования термодинамических параметров в криобиологии при охлаждении и нагреве образцов клеточных суспензий.

Цель работы – анализ известного способа мультиградиентного воздействия на охлаждаемый образец [3] для сверхбыстрого охлаждения контактов электрического аппарата защиты.

Краткая характеристика известных методов. Метод [3] относится к управляемому замораживанию биологических образцов, состоящих из клеток и тканей. Метод основан на создании бокового переменного температурного градиента за счет поперечного перемещения охлаждаемого объекта.

Традиционным методом для замораживания биологических образцов является помещение их в камеру и снижение температуры камеры в управляемом режиме. Охлаждение образцов в соответствии с этим методом происходит в направлении от наружной поверхности внутрь. Градиент температуры при этом определен приближенно, так как распределение температуры внутри объекта точно не известно. В качестве параметров, характеризующих распределение температуры внутри объекта, могут выступать температурные проводимости материалов участков объема внутри образца и характер воздействия охлаждающего поля на его поверхности. Такая неопределенность распределения температуры ограничивает возможности воздействия на процесс охлаждения, в частности, неясно, как управлять этим процессом и оптимизировать его параметры.

В работе [4] предложен другой метод контролируемого направленного замораживания, в котором образец помещен на предметное стекло микроскопа, и это предметное стекло движется, по существу, вдоль постоянного температурного градиента dT/dx (T означает температуру, x расстояние). При постоянной скорости движения $V=dx/dt$, где t означает время, каждая точка в образце охлаждается со скоростью $dT/dt = V(dT/dx)$. Данный метод характеризуется одним однородным термическим градиентом и вектором скорости перемещения объекта, что дает основание назвать этот метод градиентным.

В работе [3] приведено описание способа, реализующего метод мультиградиентного охлаждения биологических объектов, в котором температурный градиент меняется во времени вдоль движения образца.

Конструкция устройства для реализации мультиградиентного метода. Способ включает следующие операции: помещение биологического образца внутрь трубочки-соломинки, имеющей рабочий конец; перемещение трубочки-соломинки из теплой области, имеющей начальную температуру выше температуры замораживания, в холодную область, имеющую температуру, ниже температуры замораживания, причем рабочий конец соломинки входит в холодную область и замораживается раньше другого конца соломинки.

Схема устройства мультиградиентного охлаждения (УМО), реализующего способ, приведена на рис. 1.

Устройством, реализующим этот метод, состоит из трех основных частей: дорожки, устройства охлаждения для создания бокового переменного температурного градиента вдоль этой дорожки и механизма для перемещения образца вдоль дорожки. На рис. 1,а показан боковой вид варианта конструкции устройства. Нумерация позиций использована такой же, как и в оригинале [3]. Три блока 12, 14 и 16 выполнены из термически проводящего материала (меди) и выстроены в линию. Блоки 12, 14 и 16 имеют длину около 16, 2,5 и 10 см соответственно. Блоки 12 и 14 разделены зазором 18, а блоки 14 и 16 – зазором 20. Зазоры 18 и 20 могут иметь ширину от 0,01 до 1,5 см. Туннель 36 прямоугольного поперечного сечения проходит сквозь блоки 12, 14 и 16. Этот туннель определяет направление, вдоль которого перемещаются салазки 40. Салазки 40 выполнены из термически проводящего материала (меди), и несут на себе одну или более трубочек-соломинок 38, которые содержат биологические образцы для замораживания или оттаивания. Трубочки 38 обычно выполняются круглого или прямоугольного поперечного сечения, длиной от 14 до 30 см. Салазки 40 перемещаются по туннелю 36 с помощью поршня 42, к которому прикреплен стержень 44 со спиралевидной резьбой. Стержень 44 перемещается вправо с помощью винтовой передачи (на рисунке не показано). Блоки 12 и 14 включают рефрижераторы 50 и 52. Блоки 12 и 16 включают нагреватели 56-58. Холодильники 50 и 52 работают традиционно, с помощью сжатия и расширения криогенных жидкостей. Нагреватели 56-58 являются резистивными электрическими нагревателями. Блок 16 включает канал 54, в котором циркулирует жидкий азот. Холодильник 50 и нагреватель 56 служат для установления температурного градиента на участке туннеля 36, который проходит от теплой стороны 22 блока 12 к холодной стороне 24 блока 12.

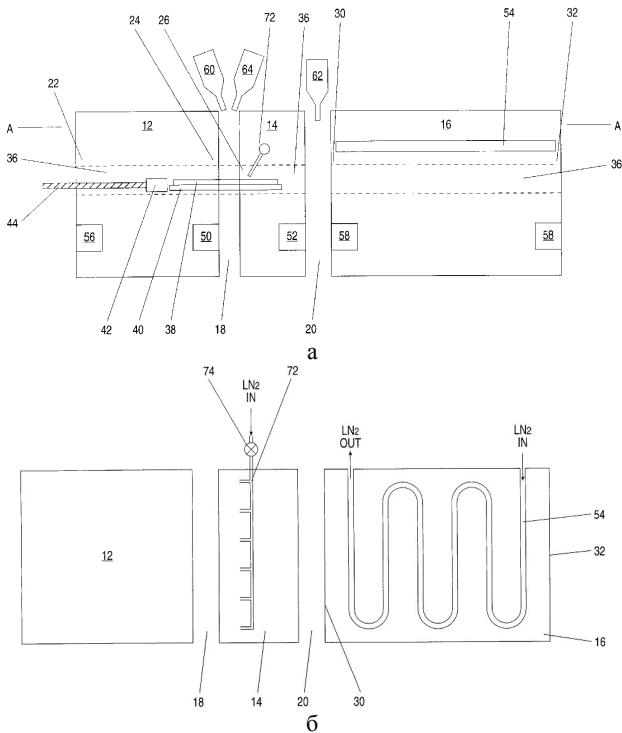


Рис. 1. Схема устройства мультиградиентного охлаждения.

Холодильник 52 поддерживает примерно постоянную температуру в блоке 14. Действие жидкого азота в канале 54 и нагревателях 57 и 58 служит для установления температурного градиента на участке тоннеля 36, который проходит от теплой стороны 30 блока 16 к холодной стороне 32 блока 16. Температуры внутри блоков 12, 14 и 16 контролируются с помощью термпар (не показано) и управляются с помощью петель обратной связи (не показано), которые включают холодильники 50 и 52 и нагреватели 56-58. Зазоры 18 и 20, разделяющие блоки 12, 14 и 16, имеют ширину не более 1,5 см. Образующийся туннель 36 проходит вдоль всего пути перемещения биологического образца, изолируя его от окружающей среды и помогая устанавливать температурный градиент. Видео камера 60 и инфракрасный термограф 64 установлены для наблюдения за условиями биологического образца в трубочке 38, когда она пересекает зазор 18. Другая такая же видео

камера 62, размещена в зазоре 20 для мониторинга условий биологического образца в трубочке 38, когда она пересекает зазор 20. Видео камеры 60 и 62 и инфракрасный термограф 64, передают сигналы на монитор (не показан), на котором оператор может наблюдать визуальное проявление и температурные контуры содержимого трубочки 38. В реальных условиях большинство трубочек 38 непрозрачные. Для визуального мониторинга и повышения качества регулирования некоторые трубочки 38 специально выполняются прозрачными (обычно стеклянными) прямоугольного поперечного сечения. Инфракрасный термограф отслеживает температурный профиль всех соломинок 38. Блок 14 снабжен каналом 72 для наполнения жидким азотом трубочки 38.

На рис. 1,б показан поперечный вид конструкции на рис. 1,а вдоль сечения А-А. Как видно на рис. 1,б, геометрия канала 54 в блоке 16 имеет вид спиралевидной намотки, открытой на концах и заполненной жидким азотом (LN_2), подведенным возле холодной стороны 32 блока 16 и выходящим возле теплой стороны 30 блока 16. Канал 72 в блоке 14 снабжен электромагнитным клапаном для подачи жидкого азота. Вариант канала 72, приведенный на рис. 1,б, пригоден для заполнения одновременно шести трубочек-соломинок.

Таким образом, рассмотренный вариант устройства обеспечивает перемещение биологических образцов через области поперечных переменных температурных градиентов и может быть использован для замораживания и оттаивания биологических образцов с управляемыми скоростями.

Что касается температурных режимов, используемых в способе, то предлагается двухшаговое как охлаждение, так и нагревание.

При охлаждении на первом шаге образец, имеющий температуру существенно выше критической температуры витрификации, охлаждается до некоторой промежуточной температуры с достаточно медленной скоростью, чтобы избежать массового образования кристаллов льда и появления механических повреждений образца. На втором шаге образец быстро охлаждается до температуры ниже критической температуры витрификации, со скоростью приблизительно от 30 до 1500 °С в минуту.

При нагревании на первом шаге образец, имеющий температуру ниже критической температуры витрификации (обычно около -110 °С), медленно нагревается до температуры витрификации со скоростью, достаточной для предотвращения растрескивания стеклоподобной массы (по меньшей мере 100 °С в минуту, но предпочтительно со степенью около 8400 °С в минуту). На втором шаге образец быстро

нагревается до температуры, существенно превышающей критическую температуру витрификации со скоростью, при которой предотвращается девитрификация, т.е. аморфная фаза состояния образца сохраняется.

Возможности направленного замораживания. В работе [4] приведен второй вариант конструкции устройства, который позволяет проводить замораживание биологических образцов с управляемой скоростью и направлением (направленное замораживание).

Когда какая-либо жидкость охлаждена до температуры ниже точки ее замерзания, она остается жидкой в таком нестабильном сверх охлажденном состоянии минимально короткое время. Замораживание начинается в позициях ядрообразования, которые распределены в основном случайно по всему объему жидкости, и распространяется по остальной жидкости. В традиционном ненаправленном способе замораживания биологических образцов лед растет с неуправляемой скоростью и морфологией, и может механически разрушить и убить клетки образца.

Направленное замораживание позволяет управлять ядрообразованием, по крайней мере, в принципе. Когда трубочка-соломинка с биологическим образцом перемещается вдоль термического градиента – от температуры выше точки замораживания образца к температуре ниже точки его замораживания, в какой-то момент времени передний край трубочки-соломинки достигает точки в пространстве, в которой температура ниже точки замораживания образца. Передний конец трубочки-соломинки при этом замораживается, например, посредством соприкосновения его с холодным объектом – малым объемом жидкого азота. Неуправляемое замораживание происходит в обратном направлении вдоль трубочки-соломинки к точке пространства, в которой температура равна точке замораживания образца. Так как трубочка-соломинка продолжает двигаться вперед, замороженная часть образца собирается вокруг ядра, замораживая жидкую часть образца; при этом жидкая часть образца проходит точку в пространстве, в которой температура равна точке замораживания образца. Таким образом, неуправляемое замораживание с закономерным итогом случайного разрушения клеток ограничено малой областью на переднем конце трубочки-соломинки, а управляемое замораживание происходит при замораживании фронта, движущегося внутри вдоль трубочки-соломинки в обратном направлении; этот фронт, по сути, неподвижен в пространстве и на него действует стационарный температурный градиент, соответствующий температуре замораживания образца.

В идеальном случае скорость замораживания фронта должна быть такой, чтобы морфология льда не разрушала клетки биологического образца. Однако этого трудно достичь, используя устройства направленного замораживания предыдущего поколения, которые имеют поперечные постоянные градиенты, потому что скорость охлаждения, соответствующая благоприятной морфологии льда, может не соответствовать другим желательным скоростям в процессе охлаждения образца. Поперечный переменный градиент в предлагаемом способе позволяет охлаждать образцы с различными скоростями в различных температурных режимах и таким образом обеспечивает полное управление ядрообразованием на переднем фронте замораживания. Например, короткая часть температурного градиента, непосредственно у холодной стороны трубочки-соломинки в точке с температурой, равной температуре замораживания образца, может равняться нулю, обеспечивая короткую область однородной температурой чуть ниже точки замораживания образца. Если образец является суспензией отдельных клеток, тогда эта температура чуть ниже температуры замораживания раствора, в котором эти клетки взвешены. Если этот образец ткань, тогда однородная температура чуть ниже (на 1-10 °С) ее температуры замораживания.

На рис. 2 показано схематическое изображение такого варианта устройства.

В этом варианте устройства блоки 12, 14 и 16 смонтированы в горловине 104 сосуда Дьюара 100 с жидким азотом 102.

Холодильники 50, 52 и нагреватели 56-58 являются термоэлектрическими приборами, а именно, стандартными криогенными холодильниками и резистивными нагревателями. Туннель 36 имеет форму круга в поперечном сечении. Вместо салазок 40 (как в предыдущем варианте устройства на рис. 1,а), для движения трубочки-соломинки 38 в продольном направлении по бокам туннеля располагаются пары ро-

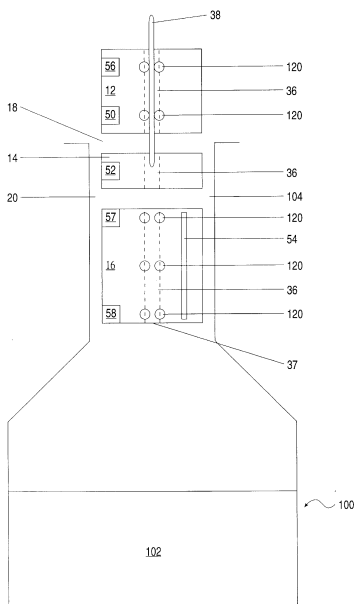


Рис. 2. Схематическое изображение устройства.

ликов 120, которые обеспечивают захват трубочки-соломинки 38 за счет трения и перемещают ее далее вниз по туннелю 36. Когда трубочка-соломинка 36 выходит из конца 37 туннеля 36, она падает в жидкий азот 102 для хранения.

Трубочки-соломинки 38 заполнены охлаждаемым образцом, как показано на рис. 3. Образец 150 помещается в середину трубочки-соломинки 38, окруженной от 10 до 100 микролитров замораживающего раствора. Передний конец 39 трубочки-соломинки 38, который проходит через туннель 36, закрывается хлопковой пробкой 180, пропитанной замораживающим раствором. Другой конец трубочки-соломинки 38 заполняется раствором сахарозы 190 и герметизируется заглушкой 200. Пробка 180, замораживающий раствор, несущий образец 160, раствор сахарозы 190 и заглушка 200 разделены пузырьками воздуха 170, как показано на рис. 3.

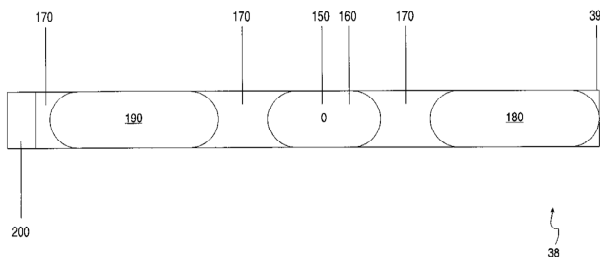


Рис. 3. Конструктивная схема заполнения трубочки-соломинки.

Холодильник 50 и нагреватель 56 установлены в блоке 12, который обеспечивает температуру 22 °С на теплой стороне и 0 °С на холодной стороне 24. Холодильник 52 обеспечивает в блоке 14 однородную температуру -7 °С. Нагреватели 57 и 58 обеспечивают температуру -10 °С на теплой стороне 30 блока 16 и -35 °С – на холодной стороне 32 блока 16. Для этой конструкции ширина зазора 18 составляет 0,84 см, а ширина зазора 20 – 1,2 см.

Трубочка-соломинка 38 помещается на салазки 40. Сторона салазок 40, несущая передний конец 39 трубочки-соломинки 38, размещена внутри туннеля 36, на теплом конце 22 блока 12. Салазки 40 перемещаются по туннелю 36 с помощью клапана 42 и стержня 44 со скоростью 20 микрон в секунду. Когда передний конец 39 трубочки-соломинки 38 входит в открытую часть 26 блока 14, клапан открывается приблизительно между 5 и 10 секундами, позволяя малому количеству жидкого азота соприкоснуться с передним концом 39 трубочки-

соломинки 38, замораживая ее содержимое. Так как блоки 12, 14 и салазки 40 сделаны из термически проводящего материала (медь), на холодном конце 24 блока 12 устанавливается температура 0°C и -7°C в блоке 14, что соответствует по существу линейному температурному градиенту $-8,3^{\circ}\text{C}$ на сантиметр в той части салазок 40 и трубочки-соломинки 38, которые перекрывают зазор 18. При движении трубочка-соломинка 38 сквозь зазор 18, ее замораживание происходит в противоположном направлении, начиная от замораживания фронта, располагаемого в зазоре 18, где температура соответствует точке замораживания растворов, содержащихся в трубочке-соломинке 38, около -3°C . (В пузырьках воздуха 170, фронт замораживания распространяется через жидкость, которая увлажняет внутреннюю стенку трубочки-соломинки 38.) Как только образец 150 пересекает зазор 18, он охлаждается от 0 до -7°C с требуемой скоростью 1°C в минуту. Видео камера 60 и инфракрасный термограф 64 используются для мониторинга морфологии и определения места фронта замораживания в зазоре 18. Таким образом, скорость, с которой трубочка-соломинка 38 перемещается через зазор 18, может очень тонко регулироваться. Температура образца 150 остается постоянной -7°C , в течении всего времени движения образца через блок 14. Как только образец 150 входит в блок 14, скорость салазок 40 возрастает до приблизительно 40 микрон в секунду и образец 150 находится около 10 минут внутри блока 14 при постоянной температуре -7°C . Когда образец выходит из блока 14, он оказывается в области, включающей как зазор 20, так и блок 16, в которой температурный градиент составляет около $-2,5^{\circ}\text{C}$ на сантиметр. В этой точке скорость салазок 40 понижается до начальной 20 микрон в секунду, так что образец 150 достигает холодного конца 32 блока 16, в котором температура составляет -35°C , приблизительно за 93 секунды, то есть, с желаемой скоростью охлаждения $0,3^{\circ}\text{C}$ в минуту. Видео камера 62 отслеживает морфологию содержимого трубочки-соломинки 38 в то время как трубочка-соломинка 38 выходит из блока 14 в зазор 20, что дает уверенность, что содержимое трубочки-соломинки 38 полностью заморожено и что образец 150 не был механически поврежден во время процесса замораживания.

Анализ возможности применения мультиградиентного метода для охлаждения электрических аппаратов. Анализ приведенных конструкций и принципы их работы показывает, что высокая эффективность сверхбыстрого охлаждения малых объектов достигается за счет управляемого движения фронта температурного градиента и регулирования параметров как движения, так и градиента температур. В

известных конструкциях коммутационных электрических аппаратов скорости движения контактов, по сути, не регулируются. Кроме того, в отличие от биологических объектов при охлаждении контактов нет необходимости следить за температурой витрификации. С учетом этого метод может быть упрощен за счет уменьшения шагов охлаждения до одного и применен для охлаждения контактов электрического аппарата.

Выводы.

1. Приведено описание мультиградиентного метода охлаждения малых объектов, в частности, биологических объектов. Метод включает помещение образца в контейнер (трубочку-соломинку) и ее перемещение в области с поперечным температурным градиентом. Регулировкой скорости перемещения и величиной температурного градиента обеспечивается полное управление режимом сверхбыстрого охлаждения или нагревания объекта.

2. Рассмотрены два варианта устройства реализующего метод мультиградиентного охлаждения малых объектов. Первый вариант применяется для горизонтально движущихся объектов, второй – для вертикально движущихся вниз объектов.

3. Рассмотрены возможности применения мультиградиентного метода для охлаждения контактов электрических аппаратов.

Список литературы: 1. Patent 5873254 USA, Int. Cl. F25D 13/06. Device and methods for multigradient directional cooling and warming of biological samples / Arav A. – Appl. No 709,350. Filed: Sep. 6, 1996; Date of Patent: Feb. 23, 1999. – 10 p. 2. Rittidech S., Boonyaem A., Tipnet P. CPU Cooling of Desktop PC by Closed-end Oscillating Heat-pipe (CEOHP) // American Journal of Applied Sciences. – 2005. – No. 2(12). – P. 1574-1577. 3. Rittidech S., Terdtoon P., Murakami P., Kamonpet P., Jom-pakdee W. Effect of inclination angles, evaporator section lengths and working fluid properties on heat transfer characteristics of a closed-end oscillating heat pipe // Proc. 6th Intl. Heat Pipe Symp., Chiang Mai, Thailand. – 2000. – P. 413-421. 4. Patent 4531373 USA, Int. Cl. F25D 13/06. Directional solidification for the controlled freezing of biomaterials / B. Rubinsky. – Appl. No 664164. Filed: Oct. 24, 1984; Date of Patent: Jul. 30, 1985. – 7 p.



Варшамова Ирина Сергеевна, младший научный сотрудник кафедры "Электрические аппараты" Национального технического университета "ХПИ". Защитила диплом магистра по специальности электрические машины и аппараты в 2006 г. с отличием. Научные интересы связаны с магнетизмом технических объектов, физическими полями электрических аппаратов.



Король Елена Геннадьевна, ассистент кафедры "Электрические аппараты" Национального технического университета "ХПИ". Защитила диплом магистра с отличием в 2004 г. по специальности электрические машины и аппараты.

Научные интересы связаны с проблемой электромагнитной совместимости в части магнитных полей.



Крюкова Наталья Валерьевна, ассистент кафедры общей электротехники Национального технического университета "Харьковский политехнический институт". Защитила диплом инженера по специальности динамика и прочность машин в 1995 г. С 2001 г. работает в области магнетизма технических объектов. В 2010 г. защитила диссертацию кандидата технических наук в НТУ "ХПИ" по специальности электрические машины и аппараты.

Научные интересы связаны с магнетизмом технических объектов



Лелок Николай Анатольевич, стажер преподаватель кафедры "Электрические аппараты". Защитил диплом магистра в НТУ "ХПИ" по специальности электрические машины и аппараты в 2006 г.

Научные интересы связаны с проблемой повышения надежности и снижения вибрации контактов электрических аппаратов.



Литвиненко Виктория Владимировна, ассистент кафедры "Электрические аппараты". Защитила диплом специалиста в НТУ "ХПИ" институте по специальности электрические машины и аппараты в 2005 г.

Научные интересы связаны с проблемой повышения надежности и снижения вибрации контактов электрических аппаратов.



Луников Валерий Сергеевич, профессор, доктор технических наук. Защитил диплом инженера, диссертацию кандидата и доктора технических наук в Харьковском политехническом институте по специальности электрические машины и аппараты, соответственно в 1973, 1987 и 2004 гг. С 1973 по 1998 гг. работал в области магнетизма технических объектов. Заведующий кафедрой "Электрические аппараты" Национального технического университета "Харьковский политехнический институт" с 2005 г. Научные интересы связаны с проблемами электромагнитной совместимости технических средств, магнетизмом технических объектов, магнитной левитацией, физическими полями электрических аппаратов.



Седова Елена Александровна, ст. преп. каф. "Электрические аппараты" Национального технического университета "ХПИ". Защитила диплом инженера-электромеханики в 1984 г.

Научные интересы связаны с проблемами электрических аппаратов, в частности с методами контроля сопротивления контактов.

*Надійшла до редколегії 22.03.2010
Рецензент д.т.н, проф. Болух В.Ф.*