

## ЭНЕРГО- И РЕСУРСОБЕРЕЖЕНИЕ

УДК 621.316

[https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-4\(45\)-29-34](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-4(45)-29-34)

Усков А.Ю., Цимбол А.И., Монастыренко В.И.

Группа приборостроительных компаний ООО «Энергия-Источник»  
и ООО «Инженерно-Техническая Компания ББМВ»

## СПОСОБ КОММУТАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК ЖИЛЫХ ПОМЕЩЕНИЙ

Современные автоматизированные системы управления энергетическими ресурсами жилых помещений (в частности, системы «Умный дом») содержат в своем составе устройства коммутации электрических нагрузок, преимущественно осуществляющие коммутацию переменного тока сети электроснабжения (~220 В, 50 Гц, 16 А). Данный класс устройств предназначен для реализации возможности удаленного управления электрическими нагрузками (включение / выключение), а также осуществления автономной работы системы по заданному сценарию. В статье рассмотрены различные способы коммутации электрических нагрузок жилых помещений электромеханическими и полупроводниковыми устройствами, которые наиболее широко применяются в настоящее время. Проведен сравнительный анализ и выявлены недостатки каждого вида коммутирующих устройств. Рассмотрен процесс образования электрической дуги в моменты коммутации электромеханических устройств. Представлены современные варианты защиты либо снижения влияния от возникновения электрической дуги в электромеханических устройствах коммутации, приводящей к эрозии контактов. Рассмотрено влияние конкретного типа электрической нагрузки на ресурс электромеханического реле. Представлены современные полупроводниковые элементы для коммутации нагрузок в сетях переменного тока, а также способы снижения электромагнитных помех в сети при их использовании. Рассмотрены перспективные решения симисторов линейки «Snabberless», снижающие общую стоимость конечного изделия и уменьшающие его массо-габаритные показатели. Предложен способ коммутации электрических нагрузок жилых помещений, который основан на объединении преимуществ электромеханических реле и полупроводниковых приборов. Данное решение позволяет при сохранении малого габарита конечного устройства продлить электрический ресурс коммутирующего устройства до временного интервала, соответствующего сроку проведения капитального ремонта, либо всему сроку эксплуатации жилого помещения.

**Ключевые слова:** коммутация, электрическая нагрузка, резистивная нагрузка, емкостная нагрузка, индуктивная нагрузка, электромеханическое реле, симистор, переходный процесс, умный дом, управление, автоматизация.

## ВВЕДЕНИЕ

Задача повышения энергетической эффективности жилых помещений является одним из приоритетных направлений при проектировании жилых зданий. Развитие средств автоматизации привело к тому, что технические решения, которые ранее использовались преимущественно только в промышленности, стали доступны сферам строительства и обслуживания жилых зданий и помещений.

Доступность средств автоматизации позволяет уже на этапе строительства внедрять системы управления зданиями, которые способны поддерживать оптимальный климат внутри помещений, осуществлять в автоматическом режиме контроль над основными параметрами инженерных сетей помещений, а также собирать и передавать актуальные данные мониторинга параметров как обслуживающим (управляющим) компаниям, так и непосредственно владельцам помещений в режиме реального времени.

На сегодняшний день появилась возможность удаленного управления практически всеми инженерными системами здания в целом и отдельно взятого помещения в частности. Например, тепловые режимы работы системы отопления [1], сценарии освещения, телекоммуникационные сети и системы, водоснабжение и водоотведение, вентиляция и др.

Использование подобных систем автоматизации в жилых помещениях ставит перед инженером проектировщиком один из важнейших вопросов – необходимость надежной коммутации электрических нагрузок, а также силовых цепей переменного тока.

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СПОСОБОВ КОММУТАЦИИ

В настоящее время приоритет в выборе исполнительного механизма системы коммутации отдается нескольким решениям [2-4]. Основными коммутирующими устройствами в цепях переменного тока являются: электромеханические или твердотельные реле, симисторы, тиристоры, схемы на биполярных, полевых или IGBT-транзисторах.

При коммутации нагрузки с током до 0,1 А и напряжением до 10 В проблем с выбором исполнительного механизма не возникает ввиду отсутствия искрения контактов реле либо сравнительно невысокой рассеиваемой мощности на полупроводниковом ключевом элементе.

Основными потребителями электроэнергии в жилых помещениях являются бытовые электроприборы, питающиеся от сети переменного тока напряжением ~220 В и током потребления до 16 А. Ограничение потребляемой мощности в жилых помещениях в настоящее время осуществляется при помощи автоматических выключателей. Типичное значение уставки срабатывания автоматического выключателя для основных электрических потребителей составляет 16 А.

Таким образом, инженеру проектировщику необходимо обеспечить такой ресурс работы коммутирующего устройства, который был бы сравним со сроком эксплуатации здания (в лучшем случае) либо сроком эксплуатации до капитального ремонта. Выбор того или иного решения будет зависеть от преимуществ и недостатков исполнительного механизма при текущих условиях эксплуатации и видах нагрузки. Наиболее

неблагоприятным режимом работы является коммутация емкостной и индуктивной нагрузок.

Использование симистора в качестве коммутатора нагрузки влечет за собой проблему отвода тепла, при протекании через него токов более 0,5 А (симистор в данном случае будет рассеивать на своем корпусе мощность около 0,8 Вт, при среднем падении напряжения на симисторе 1,6 В), что в результате приведет к его разрушению. Именно поэтому разработчики вынуждены дополнительно размещать на печатной плате устройства коммутации радиатор, что в конечном итоге ведет к увеличению габаритов изделия и его стоимости, что, в свою очередь, не всегда допустимо.

При управлении индуктивной нагрузкой, такой как электродвигатель, или при наличии помех в сети напряжение может достигнуть величины, при которой симистор может самопроизвольно открыться.

Одним из способов защиты симистора от выбросов напряжения при работе с индуктивной нагрузкой является дополнительное включение варистора параллельно основным выводам симистора.

Для защиты симистора от превышения скорости изменения напряжения применяют снабберную цепочку ( $RC$ -цепь), подключаемую аналогично варистору. Но в настоящее время на рынке уже появились симисторы, которые не требуют установки внешней снабберной цепочки, например ВТА 16-600BW [5].

Также при разработке необходимо учитывать параметр  $dI/dt$  – максимальная скорость изменения тока при открытии симистора. При превышении этого значения симистор не успевает полностью открыться, что может привести к разрушению его кристалла. Так, например, для вышеприведенного симистора ВТА 16-600BW значение  $dI/dt$  составляет 50 А/мкс.

Для увеличения ресурса работы симистора, а также снижения рассеиваемой на нем мощности в моменты коммутации и уменьшения уровня помех в сети, для управления симистором рекомендуется использовать специализированные драйверы с детектором нуля на основе оптопар, например МОС3063 [6]. В данном случае обеспечивается также гальваническая развязка между управляющими и высоковольтными цепями, что является просто необходимым.

Основным преимуществом симистора является его возможность коммутации нагрузок без искрообразования и отсутствие механически подвижных частей, что гарантирует при необходимом теплоотводе и соблюдении рекомендаций по его защите практически неограниченный ресурс работы элемента.

Отказ от применения схем на биполярных и полевых транзисторах в цепях переменного тока с напряжением ~220 В обусловлен проблемами с отводом тепла и большими габаритными размерами, а также сложностью реализации, что приводит к удорожанию конечного устройства. IGBT-транзисторы, в свою очередь, нашли свое применение в цепях напряжением более 1000 В, так как потери в открытом состоянии IGBT-транзистора обратно пропорциональны протекающему току и приложенному напряжению.

Важным преимуществом применения схем на IGBT-транзисторах является большая частота коммутации по сравнению с реле и симистором [7]. В качестве примера на рис. 1 приведена зависимость тока коллектора IGBT

транзистора К50Н603 от частоты коммутации при напряжении коллектор-эмиттер 400 В [8].

В условиях ограниченного пространства, а также большой коммутируемой мощности находят широкое применение электромеханические реле, которые имеют меньшие габариты, чем симистор в сочетании с радиатором. Но в то же время применение электромеханического реле связано с проблемой механического износа в процессе эксплуатации, который возникает в моменты замыкания и размыкания реле.

При размыкании реле между контактами образуется электрическая дуга [9], а при замыкании наблюдается возникновение искрового эффекта, что ведет к эрозии контактов реле и к дальнейшему их «залипанию», а это уже, в свою очередь, к неправильной работе устройства коммутации в целом и, как следствие, возможности возникновения аварийной ситуации.

Вторым не менее важным вопросом, возникающим при использовании электромеханических реле, является обеспечение необходимого ресурса работы (срока службы изделия в целом). Электрический ресурс реле выражается в количестве срабатываний реле под нагрузкой и зависит главным образом от величины тока нагрузки. Например, зависимость электрического ресурса от вида нагрузки реле RT314005 производства компании SCHRACK приведена в табл. 1 [10].

Согласно данным производителя электрический ресурс реле RT314005 при работе на резистивную нагрузку с коммутируемым током до 16 А составляет  $50 \times 10^5$  циклов срабатывания. В то же время для аналогичной нагрузки с коммутируемым током до 20 А ресурс составляет  $6 \times 10^5$  срабатываний [10]. Это говорит о том, что при частоте срабатываний 1 раз в 10 минут, в случае работы на номинальную нагрузку, срок службы указанного реле будет менее десяти лет. Но при увеличении тока до 20 А срок службы уменьшается до одного года.

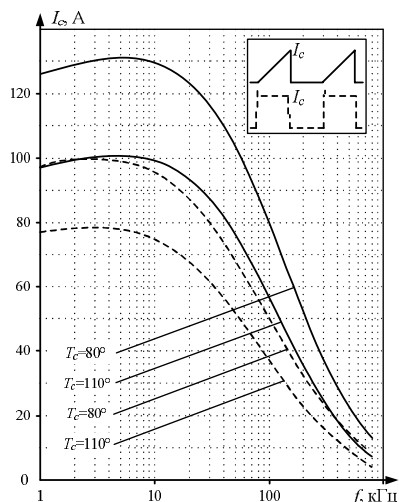


Рис. 1. Зависимость тока коллектора IGBT транзистора К50Н603 от частоты коммутации

Таблица 1

Зависимость электрического ресурса реле RT314005 производства компании SCHRACK от вида нагрузки

Load	Cycles
16A, 250VAC, NO contact, 85°C, DF 10%, UL508	$50 \times 10^3$
16A, 250VAC, NO contact, 70°C, 30min <sup>-1</sup>	$53 \times 10^3$
20A, 250VAC, NO contact, 85°C, UL508	$6 \times 10^3$
1000W incandescent lamp, 250VAC	$1,2 \times 10^3$
10A, 250VAC, cosφ=0,6, CO contact, 70°C	$200 \times 10^3$
5A, 250VAC, cosφ=1, motor, NO contact, 10min <sup>-1</sup>	$1,1 \times 10^6$
0,26A, 230VAC, cosφ=0,38, valve, NO, 25min <sup>-1</sup>	$7,6 \times 10^6$

В табл. 2 приведены усредненные значения срока службы современных малогабаритных реле в процентах в зависимости от типа нагрузки [11].

Рассмотрим процесс возникновения электрической дуги при коммутации реле индуктивной нагрузки более подробно.

Электрическая дуга при размыкании контактов появляется из-за непрерывности тока. Это объясняется законом Ленца – в электрической цепи возникает ЭДС

$$E_L = -L \frac{di}{dt},$$

которая препятствует изменению тока. Поэтому ток протекает через воздушный промежуток (зазор) между удаляющимися контактами реле (появляется электрическая дуга) [12].

На рис. 2 показаны зависимости напряжения от тока и времени.

Таблица 2

Зависимость электрического ресурса реле от вида нагрузки в процентном отношении от номинального ресурса

Тип нагрузки	Процент от номинального электрического ресурса реле, %
Резистивная	75
Индуктивная	40
Емкостная	75
Электродвигатель	20
Лампа	10

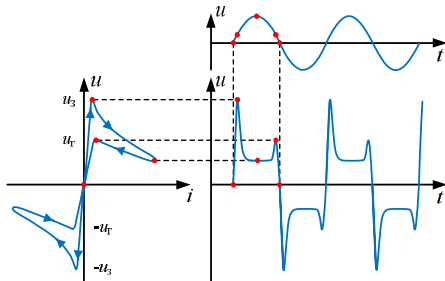


Рис. 2. Напряжение и ток на дуге при переменном токе

Дуга возникает при напряжении, равном  $U_z$ , и угасает при напряжении, равном  $U_r$ .

На графиках рис. 2 видно, что выключение реле в моменты, когда напряжение фазы равно нулю и ниже напряжения, равного  $U_r$ , образования электрической дуги на контактах реле не происходит.

Искрение контактов реле при замыкании происходит при нагрузке, имеющей емкостной характер, так как разряженная емкость в начальный момент времени является короткозамкнутым участком цепи. При этом значение тока уменьшается по мере заряда емкости.

На рис. 3 показана упрощенная схема коммутации нагрузки, имеющей емкостной характер [13].

Переходный процесс можно описать при помощи формулы

$$i(t) = \frac{U_m}{R} \times \left[ \cos\varphi \sin(\omega t + \psi - \phi) + \sin\phi \cos(\psi - \phi) e^{-\frac{t}{\tau}} \right], \quad (1)$$

где  $U_m$  – максимальное напряжение в сети переменного тока;  $R$  – активное сопротивление нагрузки;  $\phi$  – угол между током и напряжением в сети;  $\omega$  – угловая частота синусоидального тока;  $\psi$  – начальная фаза синусоидального тока;  $\tau$  – постоянная времени.

В момент включения формула (1) преобразуется в формулу (2):

$$i(0) = \frac{U_m}{R} \sin(\psi), \quad (2)$$

Из формулы видно, что максимальный ток будет протекать в момент включения, когда начальная фаза будет равна  $\pi/2$ , в этот момент времени ток может оказаться большим, чем ток в сети. График переходного процесса показан на рис. 4.

График на рис. 4 наглядно демонстрирует момент возникновения всплеска тока и, как следствие, искры на контактах реле. При этом с течением времени значение тока угасает.

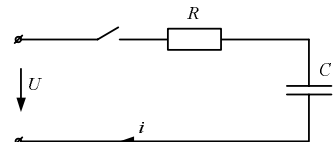


Рис. 3. Упрощенная схема коммутации

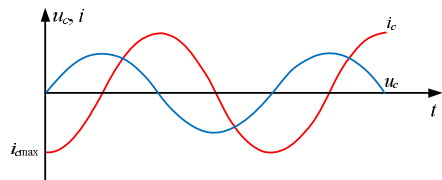


Рис. 4. График переходного процесса

Увеличивать ресурс работы реле можно путем использования различных способов искрогашения [14]. Одним из решений проблемы могло бы стать добавление в схему устройства коммутации элемента, осуществляющего контроль и переключение контактов реле именно в моменты перехода фазы через ноль.

Однако данное решение физически невозможно реализовать из-за разброса характеристик электромагнитного реле и инерционности самого механизма.

При отсутствии ограничений по габаритам устройства увеличение ресурса работы возможно при применении реле с увеличенным расстоянием между контактными группами и имеющими в своем составе постоянные магниты, которые, в свою очередь, вытесняют электрическую дугу из зазора между контактами (магнитный обдув) [15].

#### ПРЕДЛАГАЕМЫЙ СПОСОБ КОММУТАЦИИ

Более эффективным методом является уменьшение тока по сравнению с номинальным значением в момент коммутации. В данном методе возможны два варианта реализации.

Первый вариант – применение реле с многократным запасом по коммутируемому току (актуально при управлении объектами, имеющими сравнительно небольшое энергопотребление).

Второй вариант – объединение преимуществ полупроводниковых элементов и электромеханических реле в одном схемотехническом решении, а именно реализация безопасного переключения контактов путем параллельного включения к контактам электромеханического реле полупроводникового коммутационного элемента, в частности симистора.

При этом симистор необходимо использовать совместно с драйвером управления, обладающим встроенным детектором нулевой фазы, на основе оптопары, что позволит также обеспечить гальваническую развязку цепей управления от силовых цепей. Сама же катушка реле конструктивно имеет гальваническую

развязку от переключающих контактов.

Упрощенная схемная реализация совместного использования малогабаритного реле и симистора представлена на **рис. 5**. Детектор перехода фазы через ноль позволит снизить помехи в сети в моменты коммутации, а также продлит ресурс работы симистора.

Системы автоматизации жилых зданий в подавляющем большинстве предусматривают наличие управляющего микроконтроллера (МК), поэтому применение драйвера с входом, совместимым с выходами МК, значительно облегчает задачу управления симистором.

Управление малогабаритным электромеханическим реле наиболее легко осуществлять при помощи цифрового MOSFET транзистора.

На схеме, приведенной на **рис. 5**, слева расположены входы управления реле и симистора. Подача логической единицы на оптрон запускает встроенный детектор нуля, в момент перехода фазы через ноль откроется симистор.

Нагрузка (см. **рис. 5**) подключена к силовой цепи. Микроконтроллер программно реализует временную задержку в 100 мс для того, чтобы симистор гарантированно открылся. Затем МК подает логической единицы на второй вход управления включает реле.

Контакты реле шунтируют симистор до самого выключения нагрузки, поэтому ток через него не протекает и падения напряжения на нем не происходит, что, в свою очередь, не ведет к его саморазогреву и необходимости в отведении от него тепловой энергии полностью отсутствует, то есть установка радиатора не требуется.

Выключение нагрузки происходит в обратном порядке. Сперва МК отключит катушку реле и программно реализует временную задержку в 100 мс (эта задержка нужна, чтобы дождаться следующего спада тока нагрузки в полупериоде ниже тока удержания симистора). Затем МК будет подан сигнал на запитание симистора.

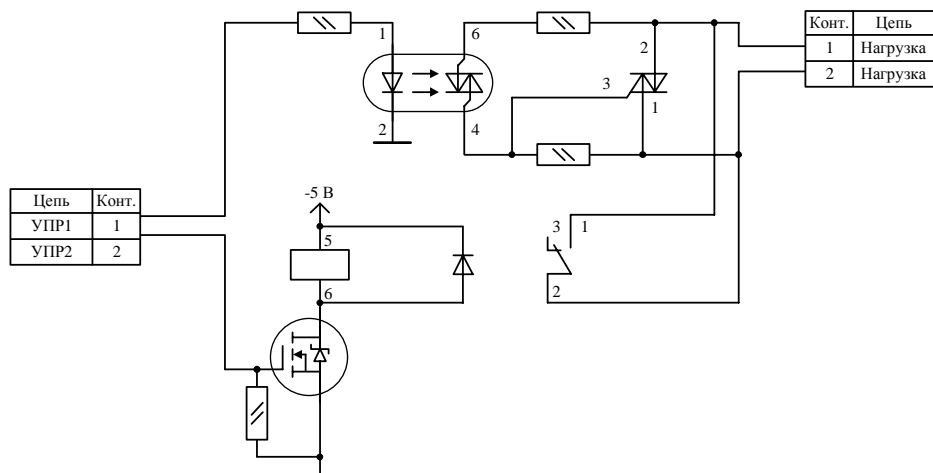


Рис. 5. Упрощенная схема совместного использования малогабаритного реле и симистор

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных экспериментальных сравнительных испытаний предложенного способа коммутации электрических нагрузок жилых помещений и существующих способов было подтверждено повышение надежности работы системы коммутации, а также увеличение ресурса работы контактной группы электромеханического реле при сохранении небольших габаритов конечного устройства коммутации.

Особо необходимо отметить, что в предложенном схемотехническом решении полностью исключается необходимость в использовании теплоотвода в виде радиатора для полупроводникового элемента.

Отказ от использования дополнительного теплоотвода также позволит инженеру-проектировщику осуществлять скрытый монтаж коммутирующего устройства в жилом помещении.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Uskov A.Yu., Lokhov S.P., Faida, E.L., Varganov V.V. An Adaptive Control System of Electric Heating for Residential Premises // Russian Electrical Engineering. Vol. 85. No 4. 2014 / Allerton Press, Inc. New York, USA, 2014. P. 198-201.
2. <https://zen.yandex.ru/media/elektrik/verdotelnoe-rele-protiv-elektromehaniki-cto-vybrat-5b9a801f02e24b00aa69df79>.
3. Мощные электромагнитные реле. Справочник инженера.

СПб., 2001. 152 с.

4. Курилин С.И. Электротехнические материалы и технология электромонтажных работ: учеб.-метод. пособие. Гомель: БелГУТ, 2009. 92 с.
5. <https://www.st.com/resource/en/datasheet/bta16.pdf>.
6. <https://www.farnell.com/datasheets/1688212.pdf>
7. IR Application Notes: Use Gate Charge to Design the Gate Drive Circuit for Power MOSFETs and IGBTs. AN-944
8. [https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-IKW50N60H3-DataSheet-v02\\_02-EN.pdf?fileId=db3a30432a40a650012a47934b1e2bea](https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-IKW50N60H3-DataSheet-v02_02-EN.pdf?fileId=db3a30432a40a650012a47934b1e2bea)
9. <https://www.compel.ru/lib/54169>
10. [https://www.te.com/commerce/DocumentDelivery/DDEContent?Action=showdoc&DocId=Data+Sheet%7FRT1%7F0219%7Fpd%7FEnglsh%7FENG\\_DS\\_RT1\\_0219.pdf%7F9-1393239-8](https://www.te.com/commerce/DocumentDelivery/DDEContent?Action=showdoc&DocId=Data+Sheet%7FRT1%7F0219%7Fpd%7FEnglsh%7FENG_DS_RT1_0219.pdf%7F9-1393239-8)
11. <http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5988-6917EN.pdf>.
12. [http://www.gigavat.com/viklyuchateli\\_elektricheskaya\\_duga.php](http://www.gigavat.com/viklyuchateli_elektricheskaya_duga.php)
13. Чумаков А.В., Илюшин В.С. Теоретические основы электротехники. Базовый комплект лекций. Тула: Тульский государственный университет, 2000. 160 с.
14. Сапожников В.В., Кравцов Ю.А., Сапожников Вл.В. Теоретические основы железнодорожной автоматики и телемеханики: учебник для вузов ж.-д. транспорта. М.: ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2008. 394 с.
15. Кривандин С. Мощные контакторы Omron для энергетики, промышленности и транспорта // Электронные компоненты. 2007. № 11. С. 36-40.

Поступила в редакцию 24 августа 2019 г.

## INFORMATION IN ENGLISH

## METHOD OF SWITCHING ELECTRICAL LOADS OF RESIDENTIAL PREMISES

Aleksey Yu. Uskov

Head of Development Department, Development Department, Group of instrument-making companies LLC "Energiya-Istochnik" and LLC "ITeK BBMV", Chelyabinsk, Russia. E-mail: UskovAlexey@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7368-208X>.

Andrey I. Tsimbol

Head of Design Department, Development Department, Group of instrument-making companies LLC "Energiya-Istochnik" and LLC "ITeK BBMV", Chelyabinsk, Russia.

Valeriy I. Monastyrenko

Design Engineer, Development Department, Group of instrument-making companies LLC "Energiya-Istochnik" and LLC "ITeK BBMV", Chelyabinsk, Russia.

Modern automated systems of management of energy resources of premises (in particular, "Smart house" systems) contain in the structure of the device of switching of electric loadings which are mainly carrying out switching of the alternating current of network of power supply (~220 V, 50 Hz, 16 A). This class of devices is designed to implement the possibility of remote control of electrical loads (on / off), as well as the implementation of automatic operation of the system according to a given script. The article deals with various methods of switching electrical loads of residential premises and electromechanical and semiconductor devices, which are most widely used at the present time. The comparative analysis is carried out and shortcomings of each type of switching devices are revealed. The process of formation of an electric arc in the moments of switching of electromechanical devices is considered. Modern variants of protection or reduction of influence from arc formation in electromechanical devices of commutation leading to erosion of contacts are presented. The

influence of a particular type of electrical load on the life of an electromechanical relay is considered. Modern semiconductor elements for switching loads in AC networks as well as ways of reducing electromagnetic interference in the networks using them are presented. Promising solutions such as "Snubberless" series triac reducing the total cost of the final product and reducing its weight and dimensions are considered. A method for switching electrical loads of residential premises is proposed, which is based on combining the advantages of electromechanical relays and semiconductor devices. This solution makes it possible both to maintain the small size of the final device and to extend the electrical life of the switching device to a time interval corresponding to the period of major repairs or the entire life of the premises.

**Keywords:** switching, electrical load, resistive load, inductive load, electromechanical relay, triac, transient, smart home, control, automation.

REFERENCES

1. Uskov A.Yu., Lokhov S.P., Faida, E.L., Varganov V.V. An Adaptive Control System of Electric Heating for Residential Premises // Russian Electrical Engineering. Vol. 85. No 4. 2014 / Allerton Press, Inc. New York, USA, 2014. P. 198-201.
2. <https://zen.yandex.ru/media/elektrik/verdotelnoe-rele-protiv-elektromehani-cto-vybrat-5b9a801f02e24b00aa69df79>.
3. Moshchnye elektromagnitnye rele. Spravochnik inzhenera [Powerful electromagnetic relays. Engineer Reference]. St. Petersburg, 2001. 152 p. (In Russian)
4. Kurilin S.L. Elektrotekhnicheskie materialy i tekhnologiya elektromontaznykh rabot. Uchebno-metodicheskoe posobie [Electrical materials and electrical installation technology. Educational-methodical manual]. Gomel, Belarusian State University of Transport, 2009. 92 p. (In Russian)
5. <https://www.st.com/resource/en/datasheet/bta16.pdf>.
6. <https://www.farnell.com/datasheets/1688212.pdf>
7. IR Application Notes: Use Gate Charge to Design the Gate Drive Circuit for Power MOSFETs and IGBTs. AN-944
8. [https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-IKW50N60H3-DataSheet-v02\\_02-EN.pdf?fileId=db3a30432a40a650012a47934b1e2bea](https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-IKW50N60H3-DataSheet-v02_02-EN.pdf?fileId=db3a30432a40a650012a47934b1e2bea)
9. <https://www.compel.ru/lib/54169>
10. [https://www.te.com/commerce/DocumentDelivery/DDEContent?Action=showdoc&DocId=Data+Sheet%7FRT1%7F0219%7Fpdf%7FEnglish%7FENG\\_DS\\_RT1\\_0219.pdf%7F9-1393239-8](https://www.te.com/commerce/DocumentDelivery/DDEContent?Action=showdoc&DocId=Data+Sheet%7FRT1%7F0219%7Fpdf%7FEnglish%7FENG_DS_RT1_0219.pdf%7F9-1393239-8)
11. <http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5988-6917EN.pdf>.
12. [http://www.gigavat.com/viklyuchateli\\_elektricheskaya\\_duga.php](http://www.gigavat.com/viklyuchateli_elektricheskaya_duga.php)
13. Chumakov A.V., Ilyushin V.S. Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki. Bazovyy konspekt lektsiy [Theoretical foundations of electrical engineering. Basic lecture notes]. Tula, Tula State University, 2000. 160 p. (In Russian)
14. Sapozhnikov V.V., Kravtsov Yu.A., Sapozhnikov V.I.V. Teoreticheskie osnovy zheleznodorozhnoy avtomatiki i telemekhaniki: uchebnik dlya vuzov zhelezno-dorozhnogo transporta [Theoretical foundations of railway automation and telemechanics: textbook for universities of railway transport]. Moscow: GOU «Training center for railway transport industry» Publ., 2008. 394 p. (In Russian)
15. Krivandin S. Powerful Omron Contactors for Power, Industry, and Transport// Elektronnye komponenty [Electronic components]. 2007. No 11. P. 36-40. (In Russian)

Усков А.Ю., Цимбол А.И., Монастыренко В.И. Способ коммутации электрических нагрузок жилых помещений // Электротехнические системы и комплексы. 2019. № 4(45). С. 29-34. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-4\(45\)-29-34](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-4(45)-29-34)

Uskov A.Yu., Tsimbol A.I., Monastyrenko V.I. Method of Switching Electrical Loads of Residential Premises. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2019, no. 4(45), pp. 29-34. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-4\(45\)-29-34](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2019-4(45)-29-34)