

Западном регионе. – Москва: ФГУ РЦСК, 2013. – 40 с. – Текст: непосредственный.

7. Зотов, А. А. Инновационный путь развития в молочном животноводстве Северо-Запада / А. А. Зотов, В. В. Кремин. – Текст: непосредственный // Ярославский агровестник. – 2013. – № 7.

### References

1. Gerasimova O.A. Organizatsiya pastbishchnykh kompleksov / O.A. Gerasimova // Selskiy mekhanizator. – 2007. – No. 9. – S. 21-22.

2. Spasov V.P. Kulturnye pastbishcha i senokosy Pskovskoy oblasti / V.P. Spasov. – Leningrad: Lenizdat, 1989. – 91 s.

3. Laretin N.A., Chirkov E.P. Metodicheskie osnovy opredeleniya ekonomicheskoy effektivnosti senokosov i pastbishch / N.A. Laretin.,

E.P. Chirkov // Ekonomika selskokhozyaystvennykh i pererabatyvayushchikh predpriyatij. – 2011. – No. 3.

4. Gerasimova O.A. Ekologichnaya tekhnologiya proizvodstva moloka na pastbishchakh: monografiya. – Velikie Luki, 2016. – 167 s.

5. Larin I.V. Sistema ispolzovaniya pastbishch i ukhoda za nimi / I. V. Larin. – Moskva: Selkhozizdat, 1960. – 251 s.

6. Prakticheskoe rukovodstvo po resursoberegayushchim tekhnologiyam i priemam uluchsheniya senokosov i pastbishch v Severo-Zapadnom regione. – Moskva: FGU RTsSK, 2013. – 40 s.

7. Zotov A.A., Kremin V.V. Innovatsionnyy put razvitiya v molochnom zhivotnovodstve Severo-zapada / A.A. Zotov, V.V. Kremin // Yaroslavskiy agrovestnik. – 2013. – No. 7.



УДК 621.31

**Б.С. Компанец, С.Ф. Нефедов, Н.И. Максимов**  
**B.S. Kompaneyets, S.F. Nefedov, N.I. Maksimov**

## РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА ЗАЩИТЫ ОТ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ 0,4 КВ

### THE DEVELOPMENT OF SURGE PROTECTION DEVICE FOR 0.4 KV ELECTRIC NETWORKS

**Ключевые слова:** перенапряжение, атмосферные перенапряжения, коммутационные перенапряжения, сельские электрические сети, последствия перенапряжений, принцип работы, устройства защиты, электронные устройства, схема устройства, блок-схема.

При эксплуатации электрооборудования время от времени появляются повышенные напряжения, которые могут вызывать неблагоприятное воздействие на изоляцию. Данное явление называется перенапряжением. Оно представляет собой всякое превышение амплитуды наибольшего рабочего напряжения на изоляции элементов электрической сети. По

продолжительности перенапряжения могут составлять от микросекунд до нескольких часов, а по природе происхождения различают внешние и внутренние перенапряжения. К внешним относятся атмосферные перенапряжения (грозовые), перенапряжения, вызванные электромагнитными бурями или вследствие ядерного взрыва. Внутренние перенапряжения вызваны резонансными явлениями, авариями и коммутацией. Стоит отметить, что перенапряжение опасно не только тем, что может повредить оборудование, но также оно способно разрушить изоляцию электроустановки или питающей её линии. Для исключения возникновения на защищаемых элементах сети повышенных напряжений, кото-

рые могут вызвать повреждение, применяются защитные аппараты. Применяемые на сегодняшний день устройства защиты не могут обеспечить высокое быстродействие и высокую чувствительность в сетях 0,4 кВ, что вызывает негативные последствия для конечных потребителей. С целью устранения ряда недостатков существующих устройств и аппаратов защиты от перенапряжения предложено создать новый вариант устройства защиты, в основе которого лежит применение силовых полупроводниковых элементов. Схематическое воплощение для данного устройства представляет собой взаимодействующую группу из бестрансформаторного блока питания, управляющего блока и силового ключа. Применение современных электронных элементов в конструкции выделяет значительные преимущества нового устройства по сравнению с существующими аналогами. Главным плюсом электронного быстродействующего ограничителя перенапряжения является его быстродействие. Также среди преимуществ стоит отметить простоту регулировки чувствительности по напряжению такого устройства. Предложенная конструкция обещает высокую эффективность в сетях 0,4 кВ.

**Keywords:** *overvoltage, atmospheric overvoltage, switching overvoltage, rural electric networks, consequences of overvoltage, principle of operation, protection devices, electronic devices, device scheme, block diagram.*

When operating electrical equipment, sometimes increased voltages appear which may cause adverse ef-

fects on insulation. This phenomenon is called overvoltage. It represents any excess of the amplitude of the largest operating voltage on the insulation of the electrical network elements. The duration of the overvoltage may range from microseconds to several hours, and the nature of the origin distinguishes between external and internal overvoltages. External overvoltages include atmospheric overvoltages (lightning), overvoltages caused by electromagnetic storms or due to a nuclear explosion. Internal overvoltages are caused by resonant phenomena, accidents and commutations. It is worth noting that overvoltage is dangerous not only because it can damage the equipment, but also it can destroy the insulation of the electrical installation or its supply line. To eliminate the occurrence of high voltages that can cause damage on the protected network elements, protective devices are used. The protection devices used today cannot provide high speed and high sensitivity in 0.4 kV networks which causes negative consequences for the end consumers. In order to eliminate a number of drawbacks of existing devices and devices for overvoltage protection, it is proposed to construct a new version of the protection device which is based on the power semiconductor elements usage. The schematic embodiment for this device is an interacting group of transformerless power supply, control unit and power switch. The use of modern electronic elements in the design distinguishes significant advantages of the new device compared to existing analogues. The main advantage of the electronic high-speed surge suppressor is its speed. Also among the advantages it is worth noting the ease of voltage sensitivity adjustment of such a device. The proposed design promises high efficiency in 0.4 kV networks.

**Компанец Борис Сергеевич**, к.т.н., доцент, каф. ЭПБ, Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова. E-mail: kompbs@mail.ru.

**Нефедов Сергей Федорович**, к.т.н., доцент, каф. ЭПБ, Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова. E-mail: altgtu@list.ru.

**Максимов Никита Игоревич**, магистрант, Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова. E-mail: altgtu@list.ru.

**Kompanyets Boris Sergeyeovich**, Cand. Tech. Sci., Assoc. Prof., Altai State Technical University named after I.I. Polzunov. E-mail: kompbs@mail.ru.

**Nefedov Sergey Fedorovich**, Cand. Tech. Sci., Assoc. Prof., Altai State Technical University named after I.I. Polzunov. E-mail: altgtu@list.ru.

**Maksimov Nikita Igorevich**, master's degree student, Altai State Technical University named after I.I. Polzunov. E-mail: altgtu@list.ru.

## Введение

При эксплуатации электрооборудования время от времени появляются повышенные напряжения, которые могут вызывать неблагоприятное воздействие на изоляцию. Данное явление называется перенапряжением. Оно представляет собой всякое превышение амплитуды наибольшего рабочего напряже-

ния на изоляции элементов электрической сети, или можно сказать проще, речь идёт о скачке напряжения. По продолжительности перенапряжения могут составлять от микросекунд до нескольких часов, а по природе происхождения различают внешние и внутренние перенапряжения. К внешним относятся атмосферные перенапряжения (грозо-

вые), перенапряжения, вызванные электромагнитными бурями или вследствие ядерного взрыва. Внутренние перенапряжения вызваны резонансными явлениями, авариями и коммутацией [1, 2].

Перебои при работе электроустановок в результате перенапряжений, особенно грозовых, происходят достаточно часто, а последствия не всегда заметны сразу [3, 4]. Стоит отметить, что перенапряжение опасно не только тем, что может повредить оборудование, но также оно способно разрушить изоляцию электроустановки или питающей её линии. При поврежденной изоляции создаётся опасность здоровью и жизни человека, и возрастает риск появления аварийных ситуаций. Разрушение элементов электрической изоляции очень часто является причиной пожаров.

К сожалению, статистических данных о выходе оборудования из строя по причине воздействия на них импульсных перенапряжений в России нет. Но международная статистика говорит о том, что масштабы этого явления серьезны. Так, по статистике немецких страховых агентств, в прошлые годы около 22% повреждений и отказов оборудования были связаны с воздействием импульсных перенапряжений. К примеру, доля повреждений компьютерного оборудования, вследствие импульсного перенапряжения из-за удара молнии, составляет 27,4%. При этом опасности подвергаются не только промышленное оборудование и приборы, но и инженерные системы зданий, в том числе и частного сектора.

Защитные аппараты применяются для исключения возникновения на защищаемых элементах сети повышенных напряжений, которые могут вызвать повреждение. Данные аппараты не должны препятствовать нормальному функционированию защищае-

мых объектов. Для простоты понимания, защитные средства можно представить как резисторы с нелинейным сопротивлением. При действии рабочего напряжения их сопротивление велико, а при повышении напряжения начинает снижаться.

Основные аппараты и устройства защиты от перенапряжений:

- 1) искровые промежутки;
- 2) трубчатые разрядники;
- 3) вентильные разрядники;
- 4) ограничители перенапряжения нелинейные;
- 5) разрядники на основе мультикамерной системы и скользящего разряда;
- 6) устройства защиты от импульсных перенапряжений.

Простейшие решения для задачи защиты от действия перенапряжений, такие как искровые промежутки и роговые разрядники в ряде случаев невозможно использовать. Несмотря на очевидные плюсы, связанные с предельной простотой их конструкции, и их низкую стоимость, эти устройства не решают вообще или недостаточно эффективно решают проблему гашения дуги, а также не вполне решают задачу защиты изоляции. Однако в качестве положительного момента отдельно следует выделить малые ёмкости межэлектродного промежутка. Данный эффект делает такие устройства достаточно безопасными в отношении высокочастотных возмущений на защищаемых объектах.

Более технологичная попытка решения проблемы гашения представлена трубчатыми разрядниками, которые имеют свой ряд существенных недостатков. Они выражаются в проблемах их обслуживания и замены, а также в опасности генерируемого ими выхлопа вследствие высокой степени ионизации газов, которыми этот выхлоп представлен. Серьёзным недостатком трубчатых

разрядников, который препятствует их широкому применению для защиты оборудования подстанций, является крутая вольт-секундная характеристика. И эту проблему решает уже конструкция вентильных разрядников. Дальнейшее развитие аппаратов защиты оставляет нерешённой одну из ключевых проблем – недостаточную скорость срабатывания.

По причине того, что современные устройства защиты от перенапряжений обладают недостаточным быстродействием, время их срабатывания зависит от скорости нарастания перенапряжения и сопоставимо с полупериодом синусоиды. Соответственно, значение напряжения, превышающее в 3-7 раз номинальное, будет оказывать воздействие на защищаемые элементы в течение этого времени. Следует разработать устройство, которое дает возможность повысить результативность защиты от перенапряжения.

Разрабатываемое устройство должно иметь следующие преимущества:

- 1) простота конструкции;
- 2) высокое быстродействие;
- 3) надежность конструкции.

### Результаты и обсуждение

С целью устранения ряда недостатков существующих устройств и аппаратов защиты от перенапряжения предложено создать новый вариант устройства защиты, в основе которого лежит применение силовых полупроводниковых элементов.

Степень развития современной элементной базы предоставляет широкий выбор активных элементов. Для создания нового устройства из трех основных видов транзисторов: полевые, биполярные и биполярные транзисторы с изолированным затвором, был выбран последний.

БТИЗ, или как его еще называют IGBT-транзистор (англ. Insulated Gate Bipolar Transistor), собрал в себе комбинацию двух своих предшественников (полевого и биполярного транзистора): на входе такой транзистор ведет себя как полевой, а на выходе – как биполярный [5]. Принцип работы такого транзистора заключается в том, что мощным биполярным транзистором управляет полевой. Следовательно, становится возможным переключение мощной нагрузки при малой мощности управляющего сигнала. Современные IGBT-транзисторы способны коммутировать токи больше 1000 А при напряжении свыше 1000 В [6].

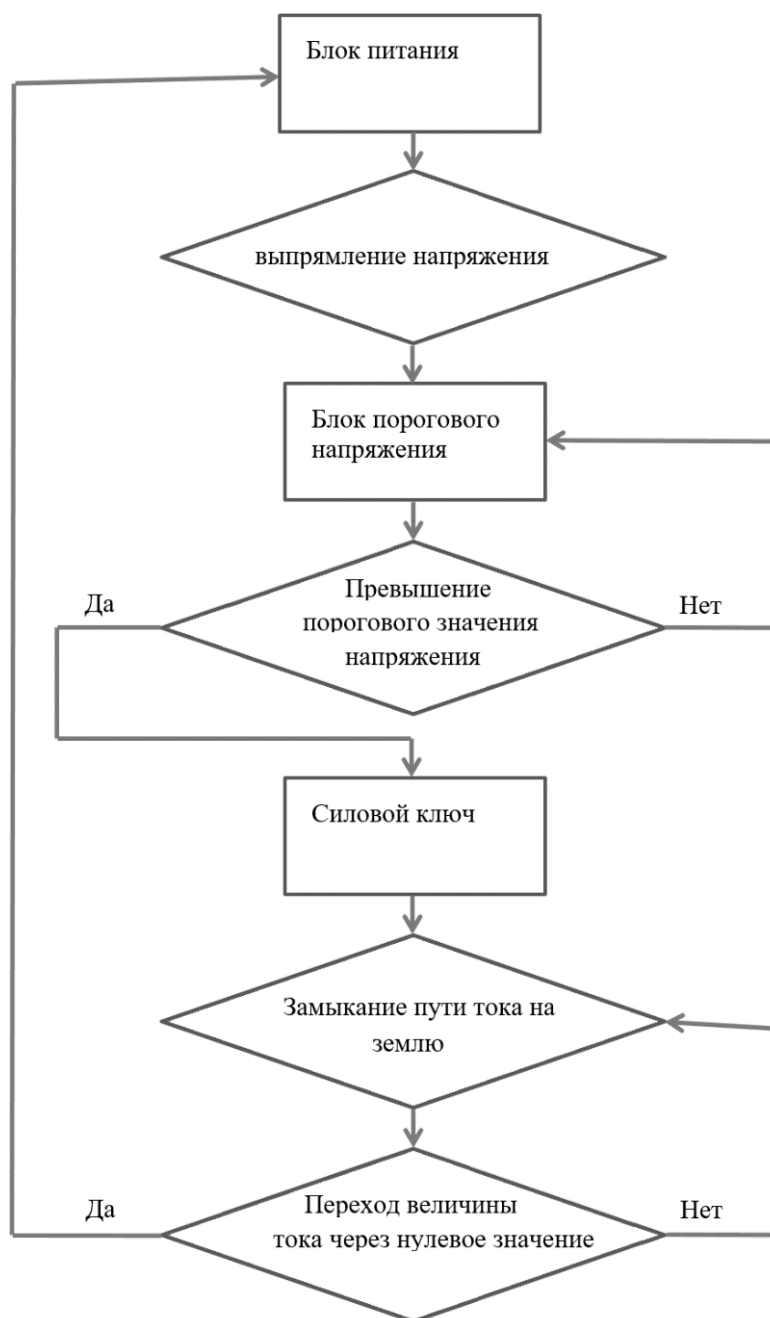
Таким образом, создаваемое устройство будет представлять собой аппарат, состоящий условно из трех блоков, работа которого может быть представлена в виде блок-схемы, показанной на рисунке 1.

Основной блок состоит из биполярного транзистора с изолированным затвором и носит название силовой ключ. Этот блок является самым важным элементом устройства, так как он отвечает за коммутацию линии на конструкции заземления. Работа данного блока заключается в том, что подача сигнала (отпирающего напряжения) на затвор с блока порогового напряжения за очень короткий промежуток времени (порядка 40 нс [7]) открывает транзистор, и импульс тока, возникший в результате аварийной ситуации перенапряжения, начинает стекать в землю. Отсюда следует, что силовым ключом управляет блок порогового напряжения. Данный блок дифференцирует сигнал, поступающий с блока питания. При превышении напряжения, приходящего с блока питания, относительно заданного порогового значения, блок порогового напряжения практически моментально начинает

подавать сигнал для открытия транзистора и перехода устройства в рабочее состояние.

Из этого можно сделать заключение, что следующий блок служит для преобразования величины переменного напряжения сети в выпрямленное напряжение, необходимое для питания всех предыдущих блоков и носит название Блок питания.

В общем виде принцип работы данного устройства основан на коммутации линии, которая происходит в момент появления перенапряжения. Коммутация осуществляется на заземленные конструкции для снижения напряжения до рабочих значений за счет работы полупроводниковых элементов.



**Рис. 1. Блок-схема, описывающая принцип работы быстродействующего ограничителя перенапряжений**

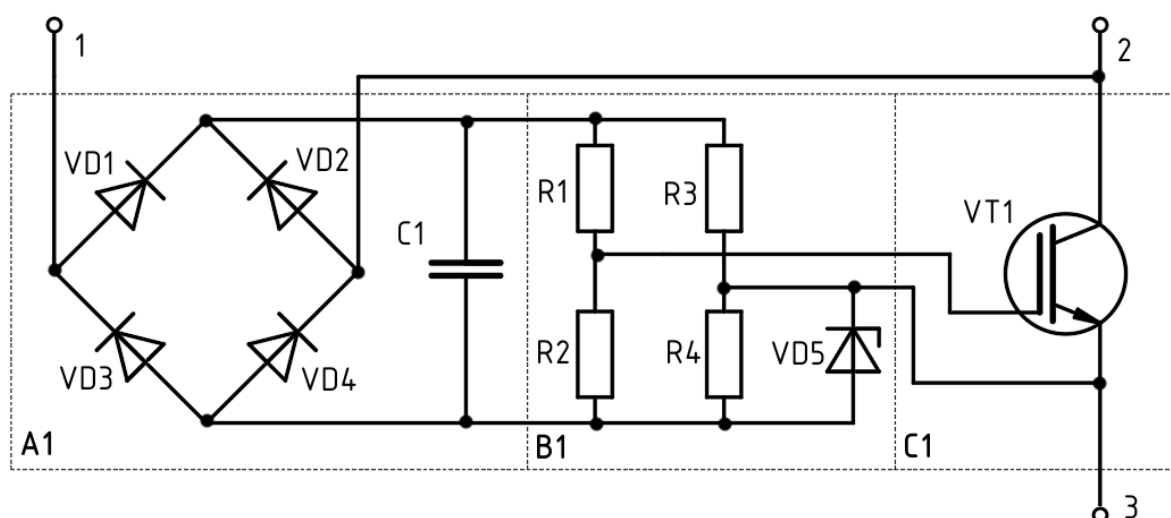


**Схемное решение устройства.** Схематическое воплощение для данного устройства выглядит достаточно просто и представляет собой взаимодействующую группу из бестрансформаторного блока питания, управляющего блока и силового ключа. Далее разберем более подробно каждый из блоков.

Первый блок А1 (рис. 2) состоит из четырех диодов VD1-VD4, которые соединены между собой по мостовой схеме. Он служит для выпрямления напряжения питания. На выходе диодного моста мы получаем двухполупериодное выпрямленное напряжение с пульсирующей составляющей. Для того чтобы сгладить эти пульсации, в схему включен соответствующий сглаживающий конденсатор С1. Следует отметить, что величина емкости конденсатора С1 подбирается достаточно большой для того, чтобы сгладить изменения напряжения при работе устройства, обеспечив тем самым корректную работу.

Управляющий блок В1 (рис. 2) состоит из четырех резисторов R1-R4, имеющих смешанное соединение, и выполняет роль делителя напряжения. Резисторы R1 и R2 со-

единены между собой последовательно; такое же соединение выполнено между резисторами R3 и R4. Пары последовательно соединенных резисторов подключаются параллельно контактам конденсатора С1. При этом величина сопротивления резистора R4 выбирается больше остальных на величину коэффициента запаса. Данное значение будет в дальнейшем определять напряжение открытия силового ключа. С центральных точек параллельных ветвей подается управляющее напряжение на полевой транзистор. Так как сопротивление R4 больше, то у нас на транзисторе будет существовать запирающий потенциал. Параллельно резистору R4 подключается стабилитрон, ограничивающий максимальную величину падения напряжения на нем. В этом случае при повышении напряжения в питающей сети будут постепенно возрастать токи и, следовательно, напряжения в ветвях R1-R2 и R3-R4, но за счет стабилитрона рост напряжения на R4 будет ограничен, а на R2 продолжится пропорционально уровню входного напряжения.



**Рис. 2. Принципиальная электрическая схема электронного быстродействующего ограничителя перенапряжений**

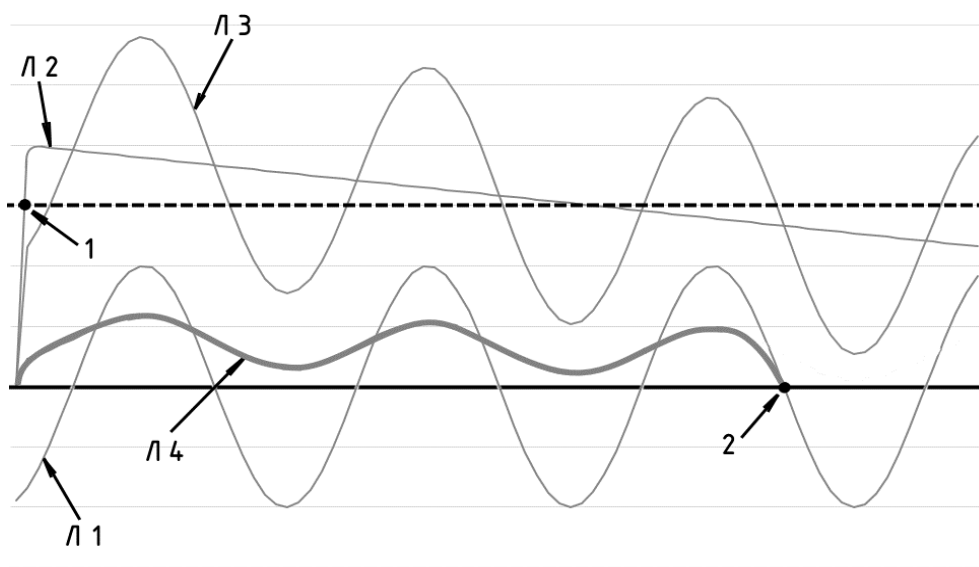
Таким образом, в тот момент, когда напряжение на R2 станет превышать напряжение на R4, произойдет открытие силового ключа и замыкание сети на землю. Закрытие транзисторного ключа будет происходить в момент, когда синусоида тока будет находиться в точке перехода из положительного значения в отрицательное (точка нулевого значения). После того как транзистор закроется, устройство переходит в режим готовности к следующему включению.

Блок силового ключа С1 (рис. 2) имеет в своем составе биполярный транзистор с изолированным затвором VT1. Данный транзистор коллектором (вывод 2) подключается к сети, а эмиттером (вывод 3) – к заземляющим устройствам. Управляющее напряжение, приходящее с блока В1, подается между затвором и коллектором.

Более наглядно работа устройства представлена графиком на рисунке 3. На нем синусоида Л1 отражает номинальное напряжение сети. Возникающая волна перенапряжения показана линией Л2. Результирующее напряжение при воздействии волны перенапряжения отражено на графике линией Л3. Величина протекающего тока показана линией Л4, данная кривая построена в масштабе тока.

В момент начала превышения заданного порогового напряжения (момент появления перенапряжения в сети) блок порогового напряжения определяет это превышение, точка 1 на рисунке 3, и подает сигнал на открытие силового ключа. При открытии транзистора волна перенапряжения начинает стекать через заземленные конструкции на землю, происходит снижение значения напряжения и продолжается до тех пор, пока транзистор не закроется. Закрытие же силового ключа происходит в тот момент, когда волна тока, вызванного вследствие перенапряжения, полностью стекает в землю. В результате значение протекающего тока пройдет через нулевое значение, что показано точкой 2 на рисунке 3. В этом случае блок порогового напряжения перестает подавать сигнал на открытие транзистора и начинает передавать запирающее напряжение на его контакты управления. После закрытия транзисторного ключа устройство вновь готово к повторному включению в работу.

Подключается разрабатываемое устройство практически аналогично существующим, за исключением небольших нюансов. Так, контакты 2 и 3 подключаются по той же схеме, что и у существующих аналогов, а вот контакт 1, который отсутствует в других аппаратах защиты, – к нулевому проводнику и обеспечивает питание устройства.



**Рис. 3. График работы электронного быстродействующего ограничителя перенапряжений**

**Достоинства и недостатки устройства.**

Применение современных электронных элементов в конструкции выделяет значительные преимущества нового устройства по сравнению с существующими аналогами. Главным плюсом ЭБОП является его быстрое действие.

Также плюсом является то, что путем изменения значений сопротивлений резисторов можно регулировать чувствительность такого устройства.

Данное устройство устанавливается аналогично существующим средствам защиты.

Для защиты элементов электрической сети 0,4 кВ схема может быть использована в предложенном виде, а для сетей большего напряжения дополнительно понадобится коммутационный аппарат, что значительно увеличит стоимость и снизит быстродействие.

**Выводы**

Предложенная конструкция обещает высокую эффективность в сетях 0,4 кВ. Она предназначена для снижения опасности аварийных ситуаций, вызванных перенапряжением. Основанием к этому стало рассмотрение целого ряда негативных эффектов, вызванных недостаточно быстрым временем срабатывания существующих защитных устройств, изучению которых, их принципов работы, уровню защиты уделялось отдельное внимание.

Был предложен новый подход к реализации функции защиты в рамках концепции рассматриваемого аппарата.

Статистика аварийных ситуаций по причине возникновения перенапряжений показала, что работа в данном направлении может снизить число случаев, приводящих к отказу электрооборудования и к ущербу почти на четверть от общего числа отказов.

Кроме того, после соответствующей модернизации существуют перспективы при-

менения таких устройств и для более высоких классов напряжений.

По факту разработки нового устройства была оформлена заявка на патент.

**Библиографический список**

1. Каждан, А. Э. Выбор ограничителей перенапряжений для защиты от коммутационных перенапряжений, возникающих при отключении индуктивных нагрузок / А. Э. Каждан, А. И. Кривенко. – Текст: непосредственный // Известия высших учебных заведений; Южно-Российский государственный технический ун-т. – 2004. – № 3 – С. 63-67.
2. Митрофанова, Е. В. Причины возникновения перенапряжений в электрических сетях и защитное оборудование от перенапряжений / Е. В. Митрофанова. – Текст: непосредственный // Сборник статей по материалам Всероссийского научно-исследовательского конкурса. – Уфа, 2020.
3. Ravaglio, M., Küster, K., Santos, S., et al. (2019). Evaluation of lightning-related faults that lead to distribution network outages: An experimental case study. *Electric Power Systems Research*. 174. Doi: 10.1016/j.epsr.2019.04.026.
4. Jiang, J., Yang, W., Ma, K., et al. (2020). Study on Lightning Protection Measures of 220 kV Transmission Line Section Across River. *Gaoya Dianqi / High Voltage Apparatus*. 56 (1): 141-147. Doi: 10.13296/j.1001-1609.hva.2020.01.021.
5. Кудрявцев, И. А. Электронные ключи: учебное пособие / И. А. Кудрявцев, В. Д. Фалкин. – Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-т, 2002. – 24 с. – Текст: непосредственный.
6. Биполярный транзистор с изолированным затвором. – Электронные данные. – [2020]. – URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Биполярный\\_транзистор\\_с\\_изолированным\\_](https://ru.wikipedia.org/wiki/Биполярный_транзистор_с_изолированным_)



затвором – Загл. с экрана. – Текст: электронный.

7. International Rectifier, Application Note AN-937 Gate Drive Characteristics and Requirements for HEXFET® Power MOSFETs / International Rectifier Company – San Jose, USA.

### References

1. Kazhdan A.E. Vybór ogranichiteley perenapryazheniy dlya zashchity ot kommutatsionnykh perenapryazheniy, vznikayushchikh pri otklyuchenii induktivnykh nagruzok / A.E. Kazhdan, A.I. Krivenko // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Yuzhno-Rossiyskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii un-t. – 2004. – No. 3. – S. 63-67.

2. Mitrofanova, E.V. Prichiny vznikoveniya perenapryazheniy v elektricheskikh setyakh i zashchitnoe oborudovanie ot perenapryazheniy / E.V. Mitrofanova // Sbornik statey po materialam Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo konkursa. – Ufa, 2020.

3. Ravaglio, M., Küster, K., Santos, S., et al. (2019). Evaluation of lightning-related faults that

lead to distribution network outages: An experimental case study. *Electric Power Systems Research*. 174. Doi: 10.1016/j.epsr.2019.04.026.

4. Jiang, J., Yang, W., Ma, K., et al. (2020). Study on Lightning Protection Measures of 220 kV Transmission Line Section Across River. *Gaoya Dianqi / High Voltage Apparatus*. 56 (1): 141-147. Doi: 10.13296/j.1001-1609.hva.2020.01.021.

5. Kudryavtsev I.A. Elektronnye klyuchi: ucheb. posobie / I.A. Kudryavtsev, V.D. Falkin. – Samara: Samar. gos. aerokosm. un-t., 2002. – 24 s.

6. Bipolyarnyy tranzistor s izolirovannym zatvorom [Elektronnyy resurs]. – Elektron. dan., [2020]. – Rezhim dostupa: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Bipolyarnyy\\_tranzistor\\_s\\_izolirovannym\\_zatvorom](https://ru.wikipedia.org/wiki/Bipolyarnyy_tranzistor_s_izolirovannym_zatvorom). – Zagl. s ekrana.

7. International Rectifier, Application Note AN-937 Gate Drive Characteristics and Requirements for HEXFET® Power MOSFETs / International Rectifier Company – San Jose, USA.



УДК 621.31

А.С. Сабельников, Б.С. Компанец  
A.S. Sabelnikov, B.S. Kompaneyets

## СНИЖЕНИЕ РАЗРУШАЮЩЕГО ДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОДУГОВОГО РАЗРЯДА ПРИ РАБОТЕ КОММУТАЦИОННЫХ АППАРАТОВ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ 10-0,4 КВ

### THE REDUCTION OF THE DESTRUCTIVE EFFECT OF ELECTRIC ARC DISCHARGE WHEN SWITCHING DEVICES ARE OPERATING IN DISTRIBUTION ELECTRICITY GRID OF 10-0.4 KV

**Ключевые слова:** электродуговой разряд, коммутационный аппарат, распределительные сети, моделирование переходных процессов, срез тока, коммутационные перенапряжения.

**Keywords:** electric arc, switching devices, distribution electricity grid, modeling of transient processes, cutoff current, switching overvoltages.