

УДК 621.316.9

## ИННОВАЦИОННЫЙ ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ПРОБЛЕМЫ БЕЗДУГОВОГО ГАШЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Лотоцкий В.Л., Лузинский В.Т.

ФГБОУ ВО «Московский технологический университет (МИРЭА),  
Москва, e-mail: lototsky@mirea.ru, vagabund@list.ru

В статье рассматривается проблема построения автоматов гашения магнитного поля, в частности, создание устройств бездуговой коммутации электрической цепи. Современной задачей создания оптимального автомата гашения магнитного поля является обеспечение бездугового отключения индуктивной нагрузки и исключение рассеивания магнитной энергии в виде тепла. В этом отношении инновационным подходом можно считать такое решение проблемы, когда магнитная энергия нагрузки, при ее отключении, была бы обратно возвращена в источник электропитания, т.е. произведена рекуперация. В статье описана разработанная авторами схема одного из устройств гашения магнитного поля для систем малой и средней мощности, одним из основных достоинств которой является полная рекуперация с незначительными тепловыми потерями.

**Ключевые слова:** автоматы гашения, магнитное поле, аварийный режим, бездуговая коммутация, рекуперация, индуктивная нагрузка, контакт, нелинейный элемент

## INNOVATIVE APPROACH OF SOLVING THE ISSUE WITH AN ARC-LESS TURN OFF, OF A MAGNETIC FIELD

Lototskiy V.L., Luzinskiy V.T.

Federal State Educational Institution of Higher Education «Moscow Technological University»,  
Moscow, e-mail: lototsky@mirea.ru, vagabund@list.ru

The article describes the construction of a device that turns off a magnetic field, in particular, creating an instrument that arc-less commutate the electric circuit. Currently there are two issues when creating an optimal device which turns off the magnetic field. First, an arc-less turn off, of an inductive load has to be ensured. Second, the diffusion of magnetic energy in form of heat has to be eliminated. In this context, the innovative approach can be considered as load's return of magnetic energy to the power supply, when turned off. In other words, recuperation should take place. The article describes a setup developed by the authors regarding a device that turns off the magnetic field for circuits of small and middle capacities. One of patten's advantages is thereby a full recuperation with negligible heat losses.

**Keywords:** turn-off devices, magnetic field, emergency condition, arc-less commutation, recuperation, inductive load, contact, nonlinear component

Гашение мощных магнитных полей представляет собой насущную проблему большой энергетики, в частности электрофизических установок с накопителями энергии. При эксплуатации подобных систем иногда возникают аварийные ситуации, когда необходимо в самый короткий промежуток времени произвести локализацию опасного узла, а затем погасить накопленную в нем магнитную энергию.

В энергетике вопрос о наиболее быстром гашении мощных магнитных полей является особенно актуальным в связи с неуклонным ростом мощности энергосистем и применением для них форсированного возбуждения, необходимого для устойчивой работы. Обе эти причины, существенно влияя на процесс гашения магнитного поля, приводят к увеличению его продолжительности, что усложняет реализацию данного процесса.

Гашением магнитного поля принято называть такой электромагнитный процесс, который заключается в быстром снижении

до практически нулевой величины магнитного потока, а, следовательно, и тока возбуждения энергосистемы. На первый взгляд может показаться, что сделать это очень просто: достаточно отключить от питания обмотку возбуждения. Однако в этом случае вследствие очень большой индуктивности цепи возникают на зажимах обмотки возбуждения значительные перенапряжения, способные вызвать пробой изоляции и связанной с ним новой аварийной ситуации. Поэтому при гашении поля принято прибегать к замыканию обмотки возбуждения на разрядное активное (линейное или нелинейное) сопротивление, способное рассеять очень большую энергию, теряемую при этом безвозвратно. Эту задачу должны выполнять специальные автоматы, называемые автоматами гашения магнитного поля.

Прибегать к гашению магнитных полей приходится не только во время тяжелых аварий. Необходимость гашения магнитного поля может появиться и в условиях нормальной эксплуатации. Однако особое

значение этот процесс приобретает при аварийных режимах, вызванных повреждениями изоляции внутри самой энергоустановки или на ее выводных зажимах. В этом случае гашение поля становится единственным способом, позволяющим ограничить глубину аварийного процесса и тем самым спасти обмотку от полного сгорания. И еще следует заметить, что к месту повреждения изоляции направляется ток короткого замыкания, который в современных электроустановках достаточно большой величины, поэтому масштаб аварии расширяется и может привести к выгоранию обмотки и активной стали.

Размеры аварии, однако, определяются не только величиной тока короткого замыкания, но продолжительностью самого аварийного процесса. Они станут тем меньше, чем быстрее осуществится гашение поля. Поэтому все способы гашения поля должны оцениваться временем продолжительности гашения, то есть временем, в течение которого магнитный поток, а следовательно, и ЭДС энергоустановки снизится до величины, близкой к нулю.

Общие тенденции в развитии современных аппаратов характеризуются не только стремлением максимально уменьшить время отключения, но также широким переходом на быстродействующую защиту. Несмотря на достигнутые в этом направлении результаты, наибольшие трудности возникают при гашении поля крупных энергоустановок. В магнитном поле этих установок тихоходных электрических машин накапливается огромная энергия, которую погасить и рассеять достаточно тяжело.

Проблема гашения мощного магнитного поля в силу своей актуальности находила свое отражение как в исследовательской деятельности [5, 6], так и в разработке конструкторских решений [3] автоматов отключения для обеспечения минимальной продолжительности процесса гашения при заданной величине перенапряжения. Автоматы для гашения поля должны обеспечивать большую надежность эксплуатации как в непрерывном режиме работы, так и в любых аварийных ситуациях. Так, например, вынужденная остановка генератора электростанции из-за неисправностей в автомате гашения поля приводит к большим убыткам. Поэтому контактные системы автоматов должны быть особенно надежными.

Автоматы для гашения поля должны быть достаточно простыми как по своей электрической схеме, так и в смысле конструктивного исполнения. Только при соблюдении этих условий может быть обеспе-

чена необходимая надежность устройства. Проблемы исследования и создания систем бездуговой коммутации электрической цепи представлены во многих работах, например Л1-Л7.

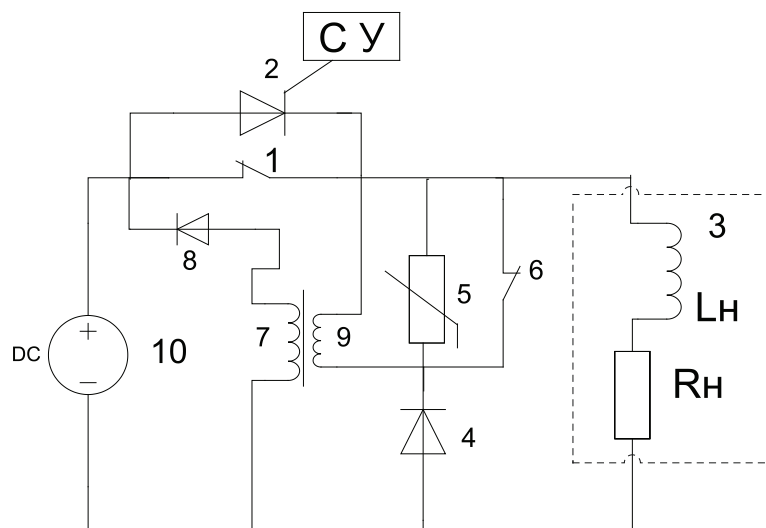
Различные виды схемотехнических исполнений автоматов гашения построены на использовании мощных нелинейных (карборундовых) резисторов, обеспечивают время гашения, составляющее 50% от постоянной времени обмотки возбуждения, что несколько хуже, чем в автоматах с дугогасительной решеткой. Однако в этих образцах отсутствуют дуговые процессы поглощения магнитной энергии и они более надежны в пожароопасном отношении. Общий недостаток всех автоматов – это принцип рассеивания магнитной энергии в виде тепла, приводящего к нагреву силовых элементов схемы, будь то нелинейные резисторы или дугогасительные решетки.

Однако из-за вопросов сложности конструктивного выполнения, снижающей надежность эксплуатации, не получили производственного воплощения многие оригинальные идеи и решения систем гашения магнитного поля.

На основании вышеизложенного можно утверждать, что задачей создания оптимального автомата гашения магнитного поля является обеспечение бездугового отключения индуктивной нагрузки и исключение рассеивания магнитной энергии в виде тепла. В этом отношении представляется наиболее рациональным такое решение проблемы, чтобы магнитная энергия нагрузки была обратно возвращена в источник электропитания, т.е. произведена ее рекуперация. Для мощных энергоустановок при современном состоянии электроэнергетики эта задача представляется технологически сложной. При этом для слаботочных систем она может быть успешно реализована уже в настоящее время.

Схема одного из устройств гашения магнитного поля для систем малой и средней мощности, разработанная авторами, приведена на рисунке.

Устройство содержит главный контакт 1, зашунтированный силовым тиристором 2, а нагрузка 3 индуктивного характера зашунтирована цепью, состоящей из последовательно соединенных обратного диода 4 и нелинейно-резистивного элемента 5, к выводам которого подключены блокирующий контакт 6 и первичная обмотка импульсного трансформатора 9. Вторичная обмотка 7 этого трансформатора через обратный диод 8 подключена к выводам источника питания 10.



*Устройство гашения магнитного поля*

Данное коммутирующее устройство обеспечивает бездуговую коммутацию и рекуперацию в источник питания энергии, накопленной в магнитном поле индуктивной нагрузки.

Рассмотрим подробнее работу данного устройства. Сигнал со схемы управления (СУ) на включение тиристора 2 подается с некоторым опережением перед моментом выключения главного контакта 1 и выдерживается до того момента, пока элементы этого контакта полностью не разойдутся. Тогда рабочий ток нормально перейдет с главного контакта на шунтирующую его цепь с тиристором 2. Индуктивная нагрузка 3 до этого была связана с источником питания 10. Только после полного раздвижения элементов главного контакта 1 подается импульс на срабатывание схемы запираания тиристора 2. До этого момента она должна быть соответственно и схмотехнически решена с точки зрения элементной базы с целью наиболее быстрого запираания тиристора 2. Применение тиристора 2 вызвано необходимостью исключения дугового процесса между элементами главного контакта 1 при их раздвижении.

После завершения запираания тиристора 2 в цепи источника питания 10 и нагрузки 3 контакты 1 и 6 разъединяются, и каждый в отдельности приходят к своему устойчивому состоянию. При этом ток индуктивной нагрузки 3 переходит в шунтирующую цепь, состоящую из обратного диода 4 и резистивного элемента 5, заблокированного контактом 6. Если в момент отключения главного контакта 1 контакт 6 был включен, то процесс гашения поля по времени сильно затянется, так как опреде-

ляется постоянной времени нагрузки, которая значительна ввиду малости ее активного сопротивления.

С момента отключения контакта 6 в цепь, шунтирующую нагрузку, вводится резистивный элемент 5, который снижает постоянную времени разрядной цепи. Падение напряжения на элементе 5 через обмотку 9 импульсного трансформатора передается в обмотку 7, связанную через диод 8 с источником электропитания 10. Таким образом, производится рекуперация энергии из нагрузки 3 в источник питания 10.

Однако эффективность этого рекуперативного процесса сильно зависит от нелинейных свойств резистивного элемента 5. Здесь следует рассмотреть три случая выполнения этого элемента: линейный, слабонелинейный, предельнонелинейный.

В случае линейного резистивного элемента процесс гашения поля сильно затягивается и рекуперация на определенном этапе просто прерывается, а дальнейшее гашение поля происходит путем нагрева резистивных составляющих цепи.

Это требует некоторых разъяснений. Дело в том, что напряжение на зажимах элемента 5 нелинейно зависит от протекающего тока, который убывает по мере протекания процесса гашения и в какой-то момент напряжение на зажимах вторичной обмотки трансформатора 9 становится меньше, чем напряжение источника электропитания, и тогда рекуперация обрывается.

В случае применения слабонелинейного резистора, например выполненного на основе карборундового материала, процесс рекуперации затягивается, и значительная

часть магнитной энергии поступает в источник электропитания, но часть энергии все равно переходит в тепло в результате нагрева резистивных элементов.

Оптимальный процесс имеет место при использовании предельно-нелинейных резисторов, в качестве которых используются силовые полупроводниковые стабилизаторы, особенностью которых является постоянство напряжения на их выводах даже при очень малых токах. А напряжение на выходной обмотке трансформатора 9 всегда выбирается с некоторым превышением по сравнению с напряжением источника электропитания. Таким образом, происходит полная рекуперация с незначительными тепловыми потерями.

Создание оптимального автомата будет зависеть от совершенствования элементной базы, которая позволит перейти к реализации более мощных систем гашения магнитного поля.

Тем самым доказана разрешимость поставленной оптимизационной задачи. Значит, при достаточном объеме статистических данных построенная таким образом модель способна делать прогнозы о необходимых ресурсах для дальнейшего развития и функционирования УКТУ.

#### Список литературы

1. Гибридные электрические аппараты низкого напряжения / Г.В. Могилевский. – М.: Энергоатомиздат, 1986.
2. Исследование возможности создания нового поколения низковольтных гибридных аппаратов с заданным

законом бездуговой коммутации / М.А. Ваткина, А.А. Григорьев // Вестник Чуваш. гос. пед. ун-та. – 2013 № 2(20). – С. 29–38.

3. К проблеме создания нового поколения низковольтных гибридных аппаратов с заданным законом бездуговой коммутации / А.А. Григорьев, А.В. Никитин // Научно-информационный вестник докторантов, аспирантов, студентов. Вестник Чуваш. гос. пед. ун-та. – 2013 № 1(78) – С. 37–42.

4. Полупроводниковые аппараты: коммутация, управление, защита / А.Г. Сосков, И.А. Соскова; под ред. А.Г. Соскова. – Киев: Каравелла, 2012. – 344 с.

5. Устройство для бездуговой коммутации электрической цепи постоянного тока / В.Л. Лотоцкий. Патент РФ № 2115970, 1998.

6. Электрические и электронные аппараты. – М.: Издательский центр Академия, 2010. «Актуальность.РФ». – Пенза, 2015. – С. 84–90.

#### References

1. Gibridnye jelektricheskie apparaty nizkogo naprjazhenija / G.V. Mogilevskij. M.: Jenergoatomizdat, 1986.
2. Issledovanie vozmozhnosti sozdanija novogo pokolenija nizkovoltnyh gibridnyh apparatov s zadannym zakonom bezdugovoj kommutacii / M.A. Vatkina, A.A. Grigorev // Vestnik Chuvash. gos. ped. un-ta. 2013 no. 2(20). pp. 29–38.
3. K probleme sozdanija novogo pokolenija nizkovoltnyh gibridnyh apparatov s zadannym zakonom bezdugovoj kommutacii / A.A. Grigorev, A.V. Nikitin // Nauchno-informacionnyj vestnik doktorantov, aspirantov, studentov. Vestnik Chuvash. gos. ped. un-ta. 2013 no. 1(78) pp. 37–42.
4. Poluprovodnikovye apparaty: kommutacija, upravlenie, zashhita / A.G. Soskov, I.A. Soskova; pod red. A.G. Soskova. Kiev: Karavella, 2012. 344 p.
5. Ustrojstvo dlja bezdugovoj kommutacii jelektricheskoj cepi postojannogo toka / V.L. Lotockij. Patent RF no. 2115970, 1998.
6. Jelektricheskie i jelektronnye apparaty. M.: Izdatelskij centr Akademija, 2010. «Aktualnost.RF». Penza, 2015. pp. 84–90.