

**В.В. ЛИТВИНЕНКО**, ас., НТУ "ХПИ", Харьков

**Е.И. СОКОЛ**, д-р техн. наук., проф., проректор, НТУ "ХПИ", Харьков

**В.С. ЛУПИКОВ**, д-р техн. наук., проф., зав. каф., НТУ "ХПИ", Харьков

**В.Ф. БОЛЮХ**, д-р техн. наук., проф., НТУ "ХПИ", Харьков

**Е.Г. БОЛЮХ**, науч. сотр., НТУ "ХПИ", Харьков

**Н.В. КРЮКОВА**, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПИ", Харьков

**И.И. КАТКОВ**, канд. биол. наук, фирма "Celltronix, Сан-Диего, США

### **ПОВЫШЕНИЕ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ЗАЩИТЫ ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КРИОГЕННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ**

Experimental researches of an induction-dynamic drive with cryogenic cooling by liquid nitrogen are resulted in a disk core of its electromagnet. Prospects of such cooling in switching electric devices are proved in view of energy-saving and increasing their working out speed.

Приведены результаты экспериментальных исследований индукционно-динамического привода с криогенным охлаждением жидким азотом дискового якоря электромагнита. Обоснованы перспективы использования такого охлаждения для повышения быстродействия и энергосбережения коммутационных электрических аппаратов.

Приведено результати експериментальних досліджень індукційно-динамічного приводу з криогенним охолодженням рідким азотом дискового якорю електромагніту. Обґрунтовано перспективи використання такого охолодження для підвищення швидкодії і енергозбереження комутаційних електричних апаратів.

**Введение.** В промышленно развитых странах в настоящее время активизируются работы по модернизации энергосистем с учетом современных разработок в области коммуникационных систем. Одно из таких направлений – создание систем Smart grid [1, 2], известной как интеллектуальная или разумная энергетика. Эта энергетика отражает стремление управлять процессами одновременной генерации электроэнергии в масштабах стран, существенно сократить ее потери и обеспечить качество при передаче, эффективное и контролируемое потребление на уровне предприятий и жилых домов и сохранения окружающей среды. Важную

роль при этом может сыграть применение криогенного охлаждения с использованием жидкого азота элементов энергосистем [3]. Одним из таких элементов энергосистем являются коммутационные электрические аппараты, одновременно выполняющие и функции защиты сетей от аварийных режимов. Преимущества охлаждения жидким азотом связаны с возможностью существенного уменьшения электрических потерь на тепло, повышением технических характеристик и обеспечением экологической безопасности. Особенно актуальной эта задача является для электрических аппаратов защиты электрических цепей, в которых требуется обеспечить максимально возможное быстроедействие отключения без существенных перенапряжений.

**Цель работы** – определение возможности повышение быстрогодействия индукционно-динамического привода автоматического выключателя за счет криогенного охлаждения его элементов.

**Рабочая гипотеза.** Повышение требований к быстродействию аппаратов защиты приводит к необходимости быстрого выявления аварийных режимов работы и повышению ограничения токов короткого замыкания. Быстродействующие автоматические выключатели относятся к аппаратам защиты с высокой токоограничивающей способностью только в области повышенных значений токов короткого замыкания. Применение в таких выключателях индукционно-динамического привода (ИДП) в качестве расцепителя главных контактов позволяет обеспечить необходимое быстродействие при возникновении аварийного режима. Конструктивно ИДП состоит из индуктора (катушки), подвижного якоря (медного диска), конденсаторной батареи (конденсатор) и системы управления и является механизмом импульсного действия. Его катушка питается импульсным током. В результате этого достигается высокая плотность магнитной энергии в зазоре между катушкой и диском, что вызывает появление больших электродинамических усилий (ЭДУ), действующих на диск.

Одной из основных характеристик такого выключателя является время срабатывания, которое для лучших образцов достигает  $1 \cdot 10^{-3}$  с. Для обеспечения такого времени срабатывания в конструкции выключателя применяют ряд оригинальных технических решений: уменьшают массу движущихся частей, воздействуют непосредственно на подвижный контакт, используют индукционно-динамический привод. Принцип действия последнего основан на динамическом взаимодействии магнитного поля электромагнита и вихревых токов его подвижного якоря (диска). В известных технических решениях в состав конструкции привода входят катушка электромагнита, подвижный якорь (диск), источник питания электромагнита (обычно емкостной накопи-

тель) и система управления его разрядом. Для концентрации магнитного потока катушки, воздействующего на диск, применяют магнитную систему, выполняемую из ферромагнитного материала. Быстродействие такого привода определяется временем движения диска от начального положения до срабатывания привода.

Проведенные с участием авторов исследования [4, 5] показали, что для охлаждения элементов (малых объектов) электрических аппаратов возможно применение жидкого азота. Такое охлаждение не использует явление сверхпроводимости, но обеспечивает существенного уменьшения электрических потерь в токоведущих элементах, что особенно важно при работе с высокими токовыми нагрузками, улучшения изоляционных показателей и обеспечения экологической безопасности. В электрических аппаратах продолжительного действия существуют критические плотности тока, при превышении которых токопроводящие элементы из-за эффекта Лейденфроста (появлении слоя паров кипящего азота на поверхности охлаждаемого проводника), резко снижают теплоотдачу и интенсивно нагреваются вплоть до термического повреждения. В устройствах импульсного действия указанное явление можно устранить за счет оптимального подбора скоростей электромагнитных и тепловых процессов в ИДП.

Идея исследований заключалась в охлаждении жидким азотом элементов ИДП в момент его срабатывания. Накопленная в емкостном накопителе энергия преобразовывалась в электромагнитную и подбором параметров разрядного контура обеспечивалось формирование очень короткого однополярного импульса тока в катушке электромагнита. При этом за счет снижения температуры охлаждаемого элемента ожидалось увеличение тока, индуцируемого в диске и, как следствие, возрастание энергии, передаваемой накопителем энергии диску и преобразующейся в механическую энергию. Поскольку скорость процессов преобразования энергии в этом случае велика, появляется возможность уменьшения времени срабатывания ИДП. В качестве охлаждаемых элементов исследовались катушка, диск, магнитная система и их комбинации.

**Физический макет ИДП.** Исследования проведены на физическом макете ИДП быстродействующего автоматического выключателя серии АЗ700 на ток 630 А. Общий вид ИДП и его элементы приведены на рис. 1. Обозначения элементов: 1 – катушка; 2 – диск (якорь); 3 – магнитная система; 4 – блок управления. Катушка намотана медной лентой сечением 20×0,2 мм, число витков – 28, размеры окна квадратной катушки 30×30 мм, средняя толщина витков катушки – 12 мм. Цилиндрический медный диск имеет размеры: диаметр – 56 мм, толщина – 1 мм.

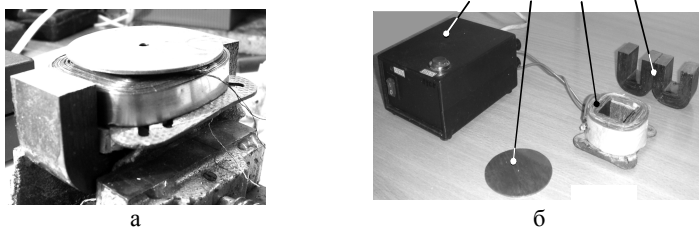


Рис. 1. Вид электромагнита физического макета ИДП в сборе (а) и его отдельных элементов (б).

Магнитная система выполнена витой из листовой электротехнической стали толщиной 0,5 мм и шириной 25 мм, разрезана на две одинаковые U-образные половинки сечения  $25 \times 12,5$  мм, которые установлены в квадратное окно катушки таким образом, что поверхности торцов катушки, половинок магнитной системы и диска располагаются в одной плоскости. Емкостной накопитель выполнен по схеме с обратным диодом [6], емкость конденсатора 660 мкФ, напряжение питания 260 В.



Рис. 2. Общий вид охлаждающей емкости

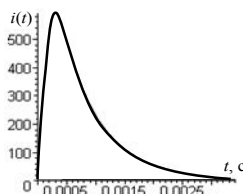


Рис. 3. Форма импульса тока катушки ИДП.

Для охлаждения элементов ИДП была изготовлена цилиндрическая открытая охлаждающая емкость, в которую заливался жидкий азот (рис. 2).

**Экспериментальные исследования.** Исследовались 6 вариантов состояния элементов ИДП: 1 – катушка с диском при комнатной температуре; 2 – тоже с магнитной системой; 3 – катушка с охлажденным в жидком азоте диском; 4 – катушка с магнитной системой и охлажденным в жидком азоте диском; 5 – охлажденные в жидком азоте катушка и диск; 6 – катушка с магнитной системой и диском, охлажденные в жидком азоте. Форма импульса тока  $i(t)$ , формируемого при разряде емкостного накопителя приведена на рис. 3.

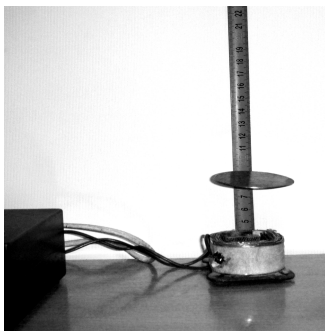


Рис. 4. Схема измерения высоты полета диска при срабатывании ИДП.

Охлаждение элементов ИДП проводилось путем погружения их в жидкий азот на время, достаточное для установления температуры жидкого азота. Охлажденные элементы извлекались из жидкого азота и подавался сигнал на срабатывание ИДП.

В экспериментах регистрировалась максимальная высота полета  $h$  диска. Отсчет проводился на фоне линейки (рис. 4). Измеренные величины  $h$  для перечисленных вариантов состояния элементов ИДП приведены в табл. 1. Для краткости введены сокращенные обозначения состояния элементов: КТ – катушка "теплая", при комнатной температуре; КХ – катушка "холодная", охлажденная примерно до температуры жидкого азота; ДТ, ДХ – диск "теплый" и "холодный" соответственно; МТ, МХ – магнитная система "теплая" и "холодная".

**Анализ результатов.** Выполненные ранее исследования ИДП с ферромагнитным сердечником [7] и повторенные в ходе данного эксперимента (вариант 2) показали, что применение ферромагнитного сердечника оправдано, так как высота полета диска увеличивается в два и более раза по сравнению с вариантом 1, при отсутствии магнитной системы.

Таблица 1 – Экспериментальные данные

Вариант	Состояние элементов	Высота $h$ , см
1	КТ, ДТ	8
2	КТ, МТ, ДТ	17
3	КТ, ДХ	55
4	КТ, МТ, ДХ	102
5	КХ, ДХ	13
6	КХ, МХ, ДХ	16

Как видно из табл. 1, наилучшим является вариант 4 выполнения ИДП с охлажденным диском (якорем), так как при этом обеспечивается наибольшая высота  $h$  полета диска. Этот же вариант и наиболее просто может быть реализован, так как требуется охлаждение единственного элемента. Другие варианты охлаждения элементов ИДП (катушки, магнитной системы) характеризуются существенно меньшими величинами  $h$  и требуют более сложных конструктивных решений.

На основе полученных экспериментальных данных проведена

оценка эффективности  $E$  ИДП по соотношению:

$$E = W_c / W_h = h_c / h_h, \quad (1)$$

где  $W_c$ ,  $W_h$  – энергия, переданная диску в "холодном" и "теплом" состоянии;  $h_c$ ,  $h_h$  – высота полета диска в этих состояниях.

Соотношение (1) получено из условия равенства потенциальной энергии диска и переданной ему электромагнитной энергии. Для варианта 4 величина эффективности равна  $E \approx 13$ .

Таким образом, применение криогенного охлаждения диска и магнитной системы в электромагните ИДП существенно увеличивает его эффективность. Кроме того, при этом возрастает начальная скорость диска, что обеспечивает повышение его быстродействия.

**Выводы.** 1. На основе проведенных экспериментальных исследований установлено, что применение магнитной системы и криогенного охлаждения с помощью жидкого азота диска электромагнита ИДП позволяют существенно увеличить его быстродействие при тех же параметрах накопителя энергии.

2. В качестве перспективного направления совершенствования индукционно-динамических приводов для коммутационных электрических аппаратов защиты может быть рекомендовано криогенное охлаждение якоря (диска) электромагнита.

**Список литературы:** 1. *Каплун В.В., Козирский В.В.* Smart Grid як інноваційна платформа розвитку електроенергетичних систем // *Енергетика та Електрифікація*. – 2011. – № 5. – С. 13-18. 2. *Rittidech S., Voonyuem A., Tipnet P.* CPU Cooling of Desktop PC by Closed-end Oscillating Heat-pipe (СЕОНР) // *American Journal of Applied Sciences*. – 2005. – No. 2(12). – P. 1574-1577. 3. *Альтов В.А., Копылов С.И.* Повышение надежности работы энергосистем с помощью сверхпроводящих устройств // *Электротехника*. – 2007. – № 8. – С. 37-42. 4. *Болюх В.Ф., Данько В.* Лінійні електромеханічні перетворювачі імпульсної дії. – Монографія. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2006. – 260 с. 5. *Лутиков В.С., Лелюк Н.А., Король Е.Г.* и др. Обзор методов сверхбыстрого охлаждения малых объектов // *Вісник Національного технічного університету "ХПІ"*. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2010. – № 29. – С. 76-88. 6. *Лутиков В.С.* Перспективы применения криогенного охлаждения в электрических аппаратах // *Вісник Національного технічного університету "ХПІ"*. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2011. – № 48. – С. 45-49. 7. *Литвиненко В.В., Лутиков В.С., Середа А.Г.* Качественный анализ влияния ферромагнитного сердечника на величину силы электромагнита индукционно-динамического привода // *Вісник Національного технічного університету "ХПІ"*. – 2010. – № 29. – С. 57-64.

*Поступила в редколлегию 20.02.2012  
Рецензент д.т.н., проф. Данько В.Г.*