

## Циклические испытания накопителя кинетической энергии большой мощности и энергоемкости

Гулиа Нурбей Владимирович, д.т.н., проф., ООО «Русский сверхпроводник», научный руководитель

Кацай Александр Владимирович, к.ф.н., ООО «Русский сверхпроводник», генеральный директор

Летом 2012 года корпорация «Русский сверхпроводник» завершила подготовку опытной документации и изготовление экспериментального образца накопителя кинетической энергии (НКЭ) большой мощности и энергоемкости. По завершении изготовления и приемочных испытаний были проведены полноценные стендовые испытания накопителя с проверкой работоспособности всех его узлов, а также некоторых основных режимов работы. В данной статье описываются достигнутые результаты проведенных испытаний циклической работы созданного накопителя кинетической энергии большой мощности и энергоемкости.

### Накопитель кинетической энергии

Компанией разработан НКЭ по классической схеме, которая включает в себя маховик, находящийся в прочном корпусе. Плоскость вращения маховика – горизонтальная, что обусловило ряд принятых в данном исполнении конструктивных решений. Вал маховика выходит из корпуса в верхней крышке, к которой присоединен фланец, держащий на себе электродвигатель фланцевого исполнения. Валы маховика и электромотора расположены соосно и соединены муфтой. Примененная электромашинка является обратимой, т.е. может работать как в режиме электродвигателя, так и в режиме генератора. Раскрученный до своих рабочих скоростей маховик накапливает энергию. При достижении максимальной рабочей частоты вращения, на которую рассчитан маховик, электромотор отключается от сети. После этого маховик вращается по инерции. При включении электромашинки в режиме генератора благодаря тому, что ротор генератора соединен муфтой с валом маховика и вращается, вырабатывается напряжение, которое передается на нагрузку.



**Рис. 1.** 3D-модель НКЭ

По вышеописанной принципиальной схеме проводилось проектирование накопителя (см. рис. 1). В ходе конструкторской работы осуществлялся расчет прочности разных форм и материалов маховика, корпуса, анализировались способы соединения валов мотора и маховика, а также исследовались другие аспекты, в том числе в части электротехнической составляющей накопителя кинетической энергии. В ходе разработки также был создан облегченный полномасштабный макет (из пластиковых материалов), на котором проводились лабораторные исследования накопителя.

В результате проведенной работы был создан прототип накопителя со следующими параметрами (см. таб. 1):

**Таблица 1**

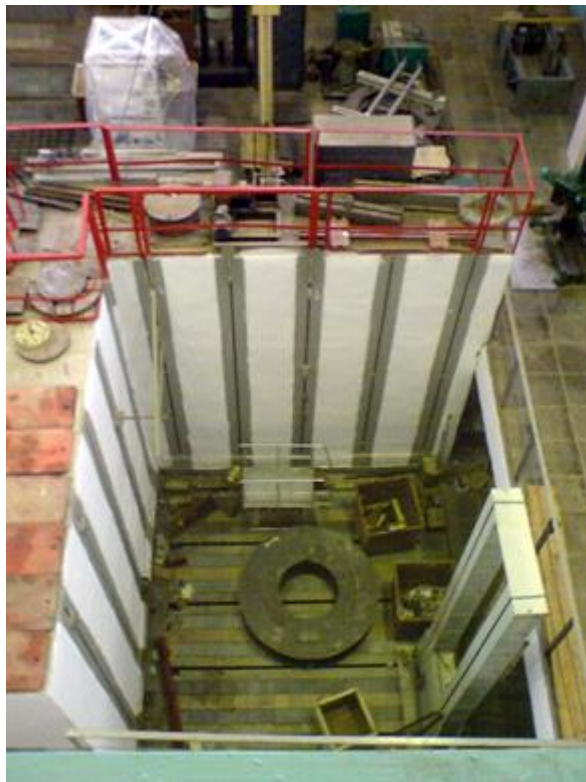
Характеристики накопителя

<b>Характеристика</b>	<b>Значение</b>
Энергоемкость, МДж	4
Мощность электромашины, кВт	22
Управление электромашиной	Частотный регулятор (инвертор)
Входное напряжение, В	380, 3 фазы
Выходное напряжение, В	730, постоянное
Выходной ток, А	42
Сопrotивление резисторов нагрузки, Ом	17

Номинальный ток двигателя, А	41
Ток перегрузки, (1,5 раза) А	62
Номинальные обороты двигателя, (при питании 50 Гц), об/мин	2930
Масса накопителя энергии (с электромашинной и блоком управления), кг	1070

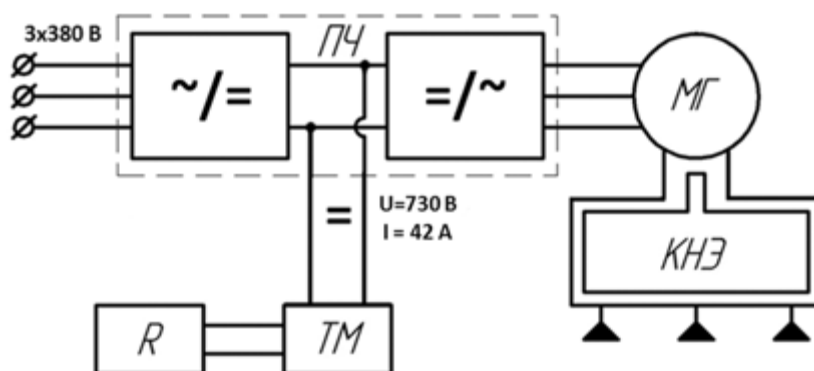
### Конструкция испытательного стенда

Для проверки работоспособности изготовленного прототипа накопителя были определены критерии и требования к стенду для проведения экспериментальных исследований. Были изучены некоторые сохранившиеся в Москве стенды, которые были предназначены для испытаний аналогичных машин. Практически все из них оказались в разобранном или непригодном состоянии. Для проведения испытаний был выбран действующий стенд в Подмоскowie (рис. 2), представляющий собой обнесенный толстыми бетонными стенами приямок.



**Рис. 2.** Фото испытательного стенда

Для проверки работоспособности накопителя кинетической энергии была составлена программа и методики проведения испытаний, были определены ключевые режимы для проверки достижения накопителем проектно заданных параметров по эффективности, надежности работы, безопасности, управляемости. На основе программы и методики испытаний сотрудниками компании был разработан и собран испытательный стенд, который включал в себя основное испытываемое и вспомогательное, в том числе измерительное оборудование. Электрическая схема подключений основного испытательного оборудования изображена на рис. 3.



**Рис. 3.** Принципиальная схема подключения электрическая

Питание всего испытательного комплекса осуществлялось от центрального щитка электропитания испытательного комплекса напряжением 380 В, 3 фазы. Питание шло на преобразователь частоты (далее ПЧ) стандартной комплектации, задача которого связана с контролем и подачей тока заданной частоты на мотор-генератор (далее МГ). Таким образом, происходил процесс управления двигателем и съема показаний с частотного регулятора. Для разгона маховика, расположенного на одном валу с мотор-генератором (рис. 4а), с преобразователя частоты подавалось напряжение  $3 \times 380$  В и ток 40 А. В режиме хранения энергии происходило отключение ПЧ и МГ, при этом маховик вращался свободно. Для переключения МГ в режим генерации проводились следующие манипуляции с ПЧ: вначале, на несколько секунд (3...5 с), инвертор включал МГ в режим разгона. Это происходило для того, чтобы подключить на короткое время энкодер электромашин, который позволял определить мгновенную частоту вращения ротора. Затем из режима электродвигателя происходил быстрый переход МГ в режим генератора ( $< 0,01$  с). Рекуперированная энергия с МГ подавалась на выпрямительный блок, встроенный в ПЧ. Далее энергия с ПЧ подавалась с постоянным напряжением 730 В и током 40 А на тормозной модуль (далее ТМ) с резисторами (далее R), где энергия, рекуперированная на МГ, переводилась в тепловую, за счет сопротивления резистора R равное 17 Ом и рассеивалась в атмосферу (см. рис. 4б). Управление параметрами осуществлялось от управляющего компьютера при помощи специализированного программного обеспечения.

Для снижения воздушного сопротивления вращению маховика использовался вакуумный насос «Edwards IDM-12» мощностью 300 Вт. Изменяемые

параметры вакуума: 100 000 – 2 500 Па.

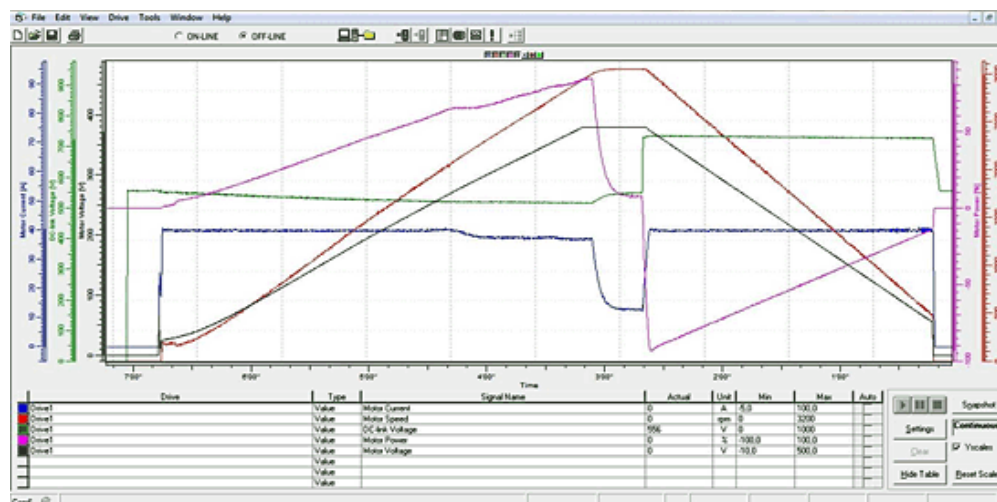


**Рис. 4.** Фото накопителя кинетической энергии (а) с преобразователем частоты и тормозными резисторами (б)

### Проведение разгонных испытаний маховика

Целями данных испытаний ставилась проверка работоспособности маховика при заданных частотах вращения, измерение полной и остаточной деформации маховика, возникающих при вращении, испытание работоспособности при основных режимах работы маховика.

Всего в ходе испытаний было проведено 44 цикла заряд-разряд с различных начальных уровней энергии маховика. Зарядка начиналась вплоть от нулевого уровня (маховик был неподвижен), и доводилась до различных промежуточных уровней, вплоть до достижения максимального расчетного объема запасаемой энергии маховика. Так, при максимальной достигнутой скорости в 4 500 об/мин энергия составила  $E = 5,04$  МДж. Разрядка же производилась от различных уровней запасенной энергии, вплоть от максимального. Конечный уровень энергии маховика при испытаниях также был различным, вплоть до полной остановки маховика, т.е. выдачи всей запасенной энергии. Наличие частотного регулятора электродвигателя позволяло управлять как временем разгона маховика, так и временем работы всего агрегата в режиме генерации.



**Рис. 5.** Сводный график проведения эксперимента №18 с накопителем кинетической энергии

В качестве примера разберем типовой опыт под №18, результаты которого обобщенно сведены в графике, выстроенном программным обеспечением автоматического преобразователя частоты (см. рис. 5). На графике видно, что в ходе этого опыта фиксация показаний параметров началась примерно с 12-й секунды, когда частота вращения маховика уже была порядка 500 об/мин. С этого момента и вплоть до 157-й секунды шел плавный линейный набор мощности мотором в соответствии с заданной ПЧ программой до 90% от номинальной (т.е. до 20 кВт). На моменте времени примерно 2 мин. 37 с электродвигатель был остановлен и маховик начал свободный выбег с достигнутой частоты вращения 3050 об/мин. Выбег продолжался до примерно 3 мин. 7 с. За эти 30 секунд скорость маховика практически значимо не изменилась. Торможение маховика вызывалось, в качестве самых основных, следующими факторами: воздушное трение ротора мотора, который находится при давлении 1 бар и является самым значимым фактором мощности потерь всего агрегата. Кроме того, на потери оказывали влияние (хотя и в существенное меньшей степени) трение подшипников мотора, подшипников маховика, остаточное давление в корпусе маховика, остаточное намагничивание ротора мотора и еще несколько факторов, гораздо меньших по влиянию.

Оценочно, исходя из ограниченности технических возможностей оперативного измерения мгновенной скорости маховика, можно было определить мощность потерь агрегата на максимальной скорости в примерно менее 1 кВт, из них мощность потерь в самом маховике на максимальной скорости порядка 200 Вт.

В указанное время 3 мин. 7 с электромашина была переведена в режим генератора. Началось такое же плавное, в соответствии с заданным для ПЧ режимом генерации, и практически линейное снижение мощности генератора до 0 кВт и скорости вращения маховика до менее 100 об/мин. Т.е., совокупный КПД накопителя кинетической энергии по выдаче накопленной механической энергии с преобразованием её в электрическую составил порядка 96,72%, что выше чем у всех других реализованных типов накопителей энергии. Вырабатываемая генератором энергия подавалась на тормозные резисторы, которые нагревались и рассеивали тепловую энергию в атмосферу. Снятие напряжения при разрядке накопителя производилось со звена постоянного тока, которое выдерживалось достаточно строго на уровне порядка 530 В с небольшим повышением в конце цикла генерации до 550 В.

Всего проведенный цикл работы маховичного накопителя энергии с зарядкой, хранением энергии и разрядкой на нагрузку продлился в этом эксперименте примерно 6,5 минут (392 секунды с момента начала регистрации данных по разгону маховика). Отношение времени разгона маховика ко времени разряда составило примерно 3/4, т.е. была задана через

частотный регулятор меньшая мощность генератора, чем номинальная мощность электромашин.

Измерение давления в корпусе маховика показало, что с начала разгона и до окончания торможения оно практически не изменилось в пределах погрешности приборов измерения. Измерение геометрических размеров маховика линейкой и микрометром и его внешний осмотр показали, что никаких изменений по прохождении эксперимента не произошло.

Также нами были проведены испытания по полному выбегу маховика совместно с ротором электромашин. Время выбега окончательно замерено не было, поскольку необходимо было освободить испытательное помещение, а за прошедшие несколько часов с момента придания маховику максимальной установленной скорости она снизилась менее чем в два раза.

## **Выводы**

Предварительные испытания накопителя кинетической энергии показали реализуемость разработанной конструкции вертикальноосевого маховика, сопряженного на одной оси с валом обратимой электромашин, выполняющей функции мотора и генератора. Более того, уже первые испытания показали, что КПД накопителя кинетической энергии или глубина разряда с учетом двойного преобразования механической энергии в электрическую (которая также преобразовывалась из переменного напряжения в постоянное) превысила аналогичные значения всех существующих типов накопителей энергии. Максимальная энергоемкость накопителя составила 5 МДж. Примененный частотный регулятор электромашин способствовал плавному регулированию ходом привода и повышению её управляемости. Конструкция накопителя позволяет легко варьировать применяемые электромашин по мощности, поскольку они располагаются вне корпуса маховика.

**Дата публикации:**

4 декабря 2012 года

**Электронная версия:**

© [НиТ. Текущие публикации](#), 1997

<http://n-t.ru/tp/ts/ci.htm>