

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЁТА КОЛИЧЕСТВА ЗАПАСЕННОЙ ЭНЕРГИИ В КРИОГЕННОЙ СИСТЕМЕ НАКОПЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ ПРИ НЕРАВНОМЕРНОМ ГРАФИКЕ НАГРУЗКИ

Благин Е.В.¹, Битерякова Е.М.¹, Казандаев В.В.¹, Павлихин И.С.¹

¹Самарский университет, г. Самара, pavlikhin.is@ssau.ru

Ключевые слова: криогенное хранение энергии, LAES, центробежный компрессор, зарядка, жидкий азот

Рост доли возобновляемых источников энергии приводит к увеличению неравномерности графиков выработки и потребления электроэнергии. Перспективным способом сглаживания пиковых нагрузок является криогенное хранение энергии. Однако остаётся недостаточно проработанным вопрос выбора рациональных режимов зарядки криогенного аккумулятора при реальных суточных графиках нагрузки с учётом нелинейных характеристик центробежных компрессоров. Цель работы – разработать методику определения количества запасённой энергии в криогенном накопителе при неравномерном графике нагрузки.

Схема криогенной системы накопления энергии (КСНЭ), используемой в данном исследовании (рис. 1).

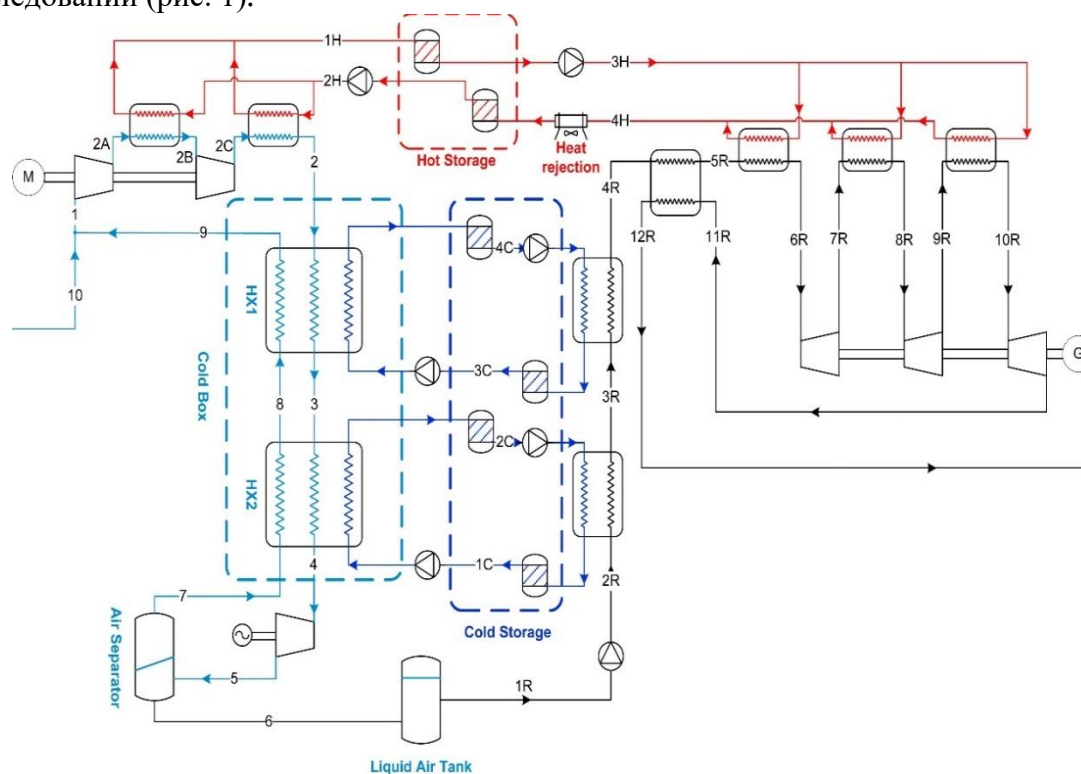


Рис. 1 – Схема КСНЭ, исследуемого в данной работе [1]

Анализируемая установка работает следующим образом. В контуре зарядки азот сжимается в двухступенчатом компрессоре с промежуточным охлаждением, при этом теплота отводится техническим маслом и аккумулируется в системе горячего хранения. Далее азот высокого давления охлаждается в рекуперативных теплообменниках с использованием пропана и метанола, после чего расширяется в турбодетандере, образуя парожидкостную смесь. Жидкий азот хранится в резервуаре. На этапе разрядки жидкий азот перекачивается, нагревается, отдавая холод теплоносителям, и затем расширяется в трёхступенчатой турбине с промежуточным перегревом от масла.

Работоспособность контура зарядки определяется возможностью получения давления выше 5 МПа, достаточного для образования жидкой фазы после дросселирования. Для моделирования нерасчётных режимов использованы характеристики центробежного компрессора: зависимости степени сжатия и КПД от расхода, аппроксимированные полиномом 2-го порядка. Приняты следующие допущения: температуры вторичных теплоносителей постоянны, соотношение степеней сжатия ступеней компрессора остаётся постоянным, расходы жидкого азота, пропана и метанола пропорциональны.

В результате решения системы уравнений, описывающей мощность компрессора, получены законы регулирования в диапазоне подводимой мощности от 150 до 1000 кВт. Установлено, что минимальная мощность, при которой в сепараторе начинает появляться жидкая фракция, составляет ≈ 100 кВт. Зависимость производительности от подводимой мощности оказалась практически линейной в диапазоне от порогового значения до номинальной мощности, что позволило пересчитывать почасовые избытки электроэнергии в массу накопленного вещества (рис. 2).

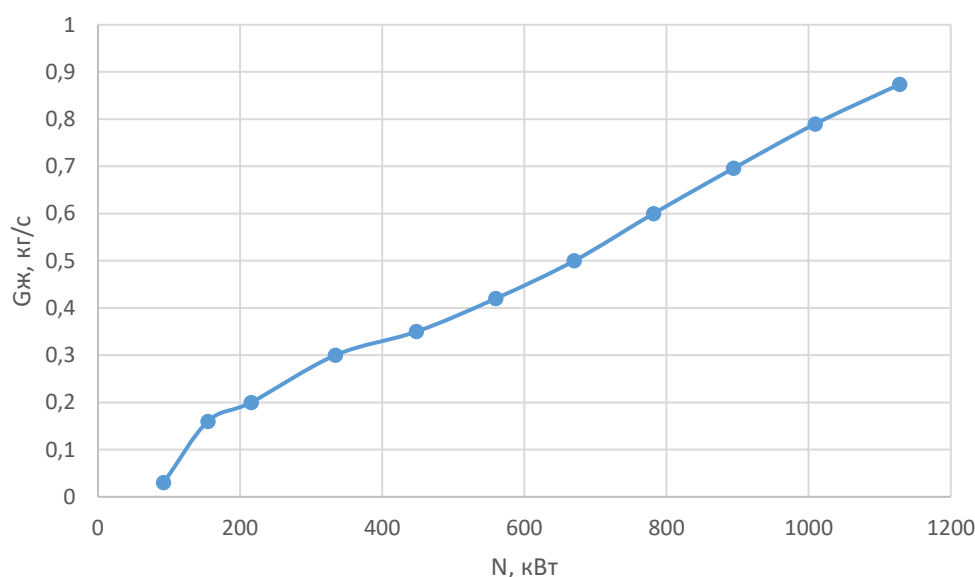


Рис. 2 – Производительность установки в зависимости от подводимой мощности

Для типового суточного графика нагрузки (избыток мощности в ночные часы, максимальное превышение оптимальной линии ≈ 2000 кВт) выполнено масштабирование установки до номинальной мощности 1000 кВт. При пороговом значении производительности 0,2 кг/с определена продолжительность работы. Суммарное накопление жидкого азота за ночной цикл составило 66 тонн, на получение которых затрачено 12,1 МВт·ч электроэнергии. Удельные энергозатраты – 650 кДж/кг.

Показано, что в начале и конце периода избыточной генерации, когда мощность ниже пороговой, рационально использовать аккумуляторы другого типа для компенсации кратковременных провалов.

Разработанная методика позволяет обоснованно выбирать пороговые значения включения/отключения зарядки, рассчитывать почасовую производительность и суммарный запас энергии. Полученные зависимости могут быть использованы при проектировании систем управления криогенными аккумуляторами в энергосистемах с высокой долей ВИЭ.

Список литературы

1. Guizzi G., Manno M., Tolomei L., Vitali R. Thermodynamic analysis of a liquid air energy storage system // Energy. 2015. V. 93. P. 1639–1647.

Сведения об авторах

Благин Евгений Валерьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры тепло-техники и тепловых двигателей, область научных интересов: термодинамика, теплопередача, криогенная техника.

Битерякова Екатерина Михайловна – инженер-конструктор НОЦ ГДИ–209, область научных интересов: термодинамика, теплопередача, криогенная техника.

Казандаев Василий Владимирович – инженер-конструктор НОЦ ГДИ–209, область научных интересов: термодинамика, теплопередача, криогенная техника.

Павлихин Иван Сергеевич – инженер-конструктор НОЦ ГДИ–209, область научных интересов: термодинамика, теплопередача, криогенная техника.

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR CALCULATING THE STORED ENERGY AMOUNT IN A CRYOGENIC ENERGY STORAGE SYSTEM UNDER UNEVEN LOAD SCHEDULE

Blagin E. V.¹, Biteryakova E. M.¹, Kazandaev V.V.¹, Pavlikhin I. S.¹

¹Samara University, Samara

Keywords: cryogenic energy storage, LAES, centrifugal compressor, charging, liquid nitrogen

A method for determining stored energy in a liquid air energy storage system under a daily load schedule with excess night generation is presented. The minimum power required to start liquid fraction production is found to be ≈ 100 kW. Using centrifugal compressor characteristics approximated by a second-order polynomial, a nearly linear relationship between liquid nitrogen output and input power is established. For a typical load profile, the total accumulated liquid nitrogen reaches 66 tonnes per night cycle with specific energy consumption of 650 kJ/kg. Recommendations for integrating with other storage types are given.