

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ КРИОГЕННЫХ АККУМУЛЯТОРОВ ЭНЕРГИИ

Благин Е.В.¹, Угланов Д.А.¹

¹Самарский университет, г. Самара, blagin.ev@ssau.ru

Ключевые слова: Криогенные аккумуляторы энергии, коэффициент аккумулирования, эксергетический КПД, удельная энергоемкость.

Криогенные аккумуляторы энергии обладают значительным потенциалом в области повышения стабильности работы энергосистем за счет снижения неравномерности графиков нагрузок и выработки электроэнергии. Они обладают более высокой энергоемкостью по сравнению с другими видами аккумулирования энергии, но обладают относительно низкой эффективностью хранения.

Традиционно системы накопления энергии оцениваются коэффициентом аккумулирования $\eta_{ак}$ – отношением количества электроэнергии, возвращаемой в сеть на этапе разрядки, к количеству электроэнергии, затраченной из электросети на этапе зарядки:

$$\eta_{ак} = \frac{E_{раз}}{E_{зар}}. \quad (1)$$

Энергию, вырабатываемую на этапе разрядки и зарядки, можно определить следующим образом:

$$N_{раз} = \sum N_{ti} - \sum N_{hi} - \sum N_{ki},$$

$$N_{зар} = \sum N_{hi} + \sum N_{ki} - \sum N_{ti},$$

где $\sum N_{ti}$ – суммарная мощность турбин;

$\sum N_{hi}$ – суммарная мощность насосов;

$\sum N_{ki}$ – суммарная мощность компрессоров.

Для большей объективности различные виды энергии необходимо привести к общему виду, что можно, например, сделать при помощи оценки эксергетической эффективности системы:

$$\eta_{экс} = \eta_{эксраз} \cdot \eta_{эксзар}, \quad (2)$$

где $\eta_{эксраз}$ – эксергетический КПД контура разрядки;

$\eta_{эксзар}$ – эксергетический КПД контура зарядки.

Результатом работы контура зарядки является криопродукт, на получение которого затрачивается электроэнергия и прочие источники энергии. Таким образом эффективность контура зарядки будет определяться отношением эксергии криопродукта к сумме затраченной электроэнергии и разницы входящих и выходящих эксергий системы:

$$\eta_{эксзар} = \frac{Ex_{сж}}{E_{зар} + \sum Ex_{зарвх} - \sum Ex_{зарвых}}. \quad (3)$$

Результатом работы контура разрядки является электроэнергия, на получение которой тратится эксергия криопродукта и прочие источники энергии. Таким образом эффективность контура разрядки будет определяться отношением выработанной электроэнергии к сумме эксергии криопродукта и разницы входящих и выходящих эксергий системы:

$$\eta_{эксраз} = \frac{E_{раз}}{Ex_{сж} + \sum Ex_{развх} - \sum Ex_{развых}}. \quad (4)$$

Эксергетический КПД показывает эффективности аккумулятора с учетом не только всех видов подведенной энергии к аккумулятору, но и с учетом качества этой энергии.

Кроме эффективности аккумуляторов большое значение имеет стоимость хранимой энергии. Для оценки этого показателя используется величина удельной энергоемкости аккумуляторов – отношения количества запасенной энергии к стоимости аккумулятора:

$$l_{уд} = \frac{Ex_{сж}}{z} \quad (5)$$

Для анализа эффективности аккумуляторов была исследована выборка из 30 публикаций, охватывающей временной период с 1977 по 2021 год.

Анализ характеристик установок, обобщенных в классы, приведен на рис. 1 и 2.

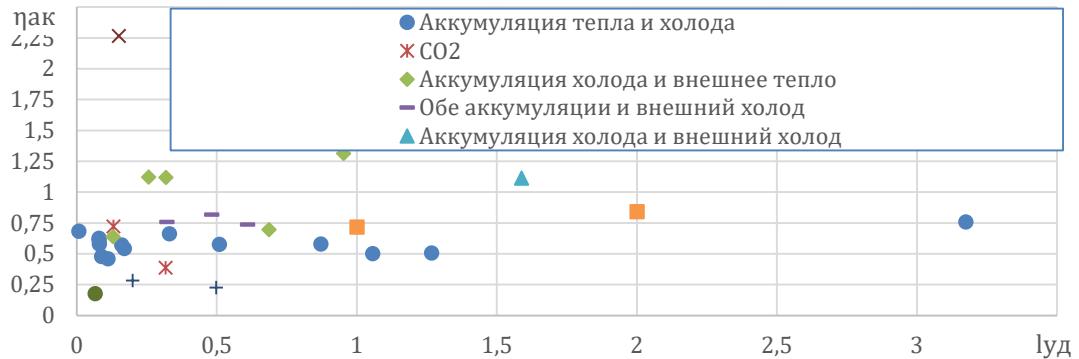


Рис. 1 – Зависимость коэффициента аккумулирования от удельной энергоемкости

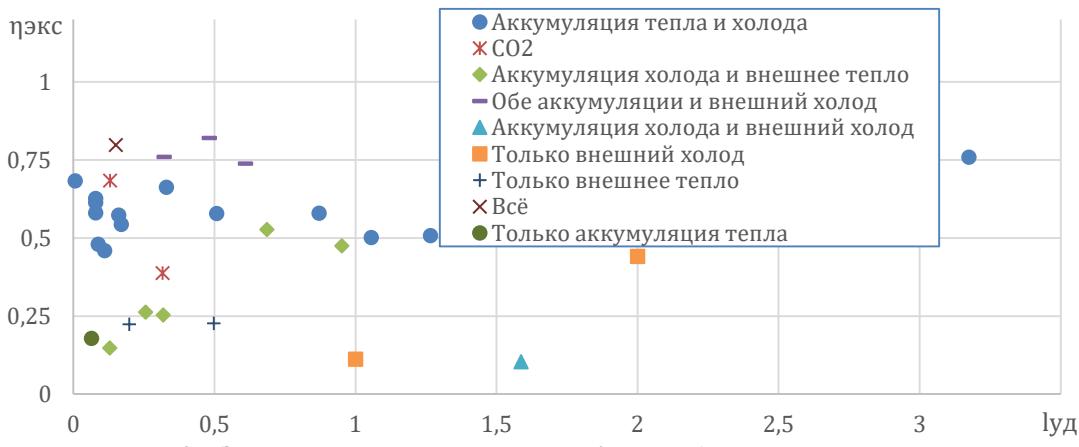


Рис. 2 – Зависимость эксергетического КПД от удельной энергоемкости

Анализ значений коэффициента аккумулирования (рис. 3) показывает, что при определенных условиях возможно получить на этапе разрядки больше электроэнергии, чем было затрачено на этапе зарядки. Это объясняется тем, что электроэнергия не является единственным видом энергии, используемым данным аккумулятором, т.е. обязательным условием для этого является наличие внешнего источника тепла и/или холода. При этом высокий коэффициент аккумулирования не обязательно означает эффективную установку с точки зрения степени термодинамического совершенства. Так, например, установка обладает коэффициентом аккумулирования 111,6 %, однако это достигается за счет использования значительного количества холода от сжиженного природного газа, который используется с достаточно низкой эффективностью, что приводит к значению эксергетического КПД, равному 10,4 %.

Анализ коэффициентов аккумулирования показал, что в определенных случаях при использовании внешнего холода и/или тепла его значение может достигать 100% или даже превышать его. При этом это не обязательно означает высокую эффективность системы, так как этим показателем не оценивается качество преобразования внешних источников тепла и/или холода. Для оценки качества преобразования энергии предлагается использовать эксергетический КПД установок, который представляет собой произведение эксергетических КПД циклов зарядки и разрядки и учитывает вспомогательный подвод тепла и/или холода. Для эффективных установок вполне достижимо значение эксергетического КПД порядка 70%, но для этого обязательно нужно вспомогательное аккумулирование тепла сжатия в компрессорах и вспомогательное аккумулирование холода сжиженного криопродукта.

Оценка удельной энергоемкости показала достаточную низкую надежность данного показателя, так как модели стоимости дают большой разброс значений между собой и сильно зависят от масштабного фактора. Кроме того, для расчета стоимости теплообменников необходим расчет их тепловых диаграмм, что не всегда проводится авторами публикаций, из-за чего оценка стоимости становится невозможной.

Результаты работы получены при финансовой поддержке Минобрнауки России (проект № FSSS-2024-0017).

Сведения об авторах

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

Угланов Дмитрий Александрович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры теплотехники и тепловых двигателей, область научных интересов: термодинамика, теплопередача, криогенная техника.

ASSESSMENT OF CRYOGENIC ENERGY STORAGE SYSTEMS EFFICIENCY

Blagin E.V.¹, Uglanov D.A.¹

¹Samara University

Cryogenic energy storage systems have significant potential in the field of increasing the stability of power systems by reducing the unevenness of load schedules and electricity generation. They have a higher energy capacity compared to other types of energy storage, but have a relatively low storage efficiency. Due to the wide variety of cryogenic energy systems designs, the use of any one efficiency indicator does not provide an objective picture, so this paper considers the assessment of the efficiency of energy systems in terms of energy, exergy and economic efficiency, and proposes a comprehensive indicator that takes into account all of the above factors. Analysis of published installations shows that the most efficient energy accumulators have a conversion efficiency of about 70% due to the use of compression heat in compressors and the cold of the cryogenic product.