

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА РАЗРЯДКИ КРИОГЕННОЙ СИСТЕМЫ НАКОПЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ

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

¹Самарский университет, г. Самара, kazandaev.vasya@mail.ru

Ключевые слова: криогенная система накопления энергии; разрядка; пиковая нагрузка; установленная мощность; двухставочный тариф; график потребления.

Сглаживание графиков позволяет снизить пиковые нагрузки на генерирующее оборудование, что увеличивает его срок службы и уменьшает износ. Оно минимизирует риск аварийных отключений и повышает общую надежность энергосистемы, предотвращая перегрузки в часы максимального потребления.

Выравнивание графика нагрузки дает возможность более эффективно использовать базовые (наиболее экономичные) мощности электростанций, снижая потребность в дорогостоящей пиковой генерации. Это приводит к значительной экономии топлива и снижению себестоимости производимой электроэнергии для всех участников рынка. Сглаживание позволяет оптимизировать режимы работы сетевого комплекса, уменьшая потери электроэнергии при передаче и распределении. Оно создает условия для более успешной интеграции в энергосистему нестабильных возобновляемых источников энергии (ВИЭ), таких как солнце и ветер.

Важное значение для экономической эффективности таких систем имеет оптимизация режима разрядки: выбор между кратковременной выдачей высокой мощности в острый пик и длительной работой с меньшей мощностью при плавном графике нагрузки напрямую влияет на величину платы за установленную мощность, являющуюся немалой частью двухставочного тарифа:

$$Z_{\text{сум}} = N_{\text{уст}} \cdot c_{\text{уст}} + \mathcal{E}_{\text{ээ}} \cdot c_{\text{кВт*ч}},$$

где $Z_{\text{сум}}$ – плата за электроэнергию; $N_{\text{уст}}$ – установленная мощность; $c_{\text{уст}}$ – тариф за установленную мощность; $\mathcal{E}_{\text{ээ}}$ – потребляемая электроэнергия; $c_{\text{кВт*ч}}$ – тариф за потребляемую электроэнергию.

На графике потребления электроэнергии при разрядке КСНЭ могут быть два потенциально максимальных значения мощности. Если мощность КСНЭ небольшая, а режим работы долгосрочный, то максимум потребляемой мощности также будет располагаться в центре графика, как и в случае без работы аккумулятора. Если мощность КСНЭ большая, а режим работы долгосрочный, то на графике нагрузки появляется «яма» в центре, а наибольшее значение потребляемой мощности будет располагаться на границе «ямы».

Уместно будет предположить, что минимальное значение максимальной потребляемой мощности предприятием от энергосетей будет в момент, когда два этих локальных максимума будут равны. Для подтверждения этой гипотезы можно определить величину сэкономленной установленной мощности для различных значений времени работы контура разрядки аккумулятора:

$$\Delta N_{\text{уст}} = A + B - N_{\text{max}},$$

где $\Delta N_{\text{уст}}$ – разница между максимальной потребляемой мощностью без и с учетом процесса разрядки; A – амплитуда изменения мощности в течение суток; B – средняя потребляемая мощность; N_{max} – максимальная потребляемая мощность без учета процесса разрядки.

Для синусоидального графика потребления электроэнергии график величины сэкономленной установленной мощности от времени работы контура разрядки аккумулятора представлен на рис. 1.



Рис.1 – График величины сэкономленной установленной мощности от времени работы контура разрядки аккумулятора

Из анализа графика видно, что для заданных исходных данных максимальная экономия установленной мощности составит порядка 0,36 МВт, а оптимальное время работы контура разрядки аккумулятора составит 5 часов. График почасовой нагрузки при 5-часовой работе контура разрядки представлен на рис. 2.

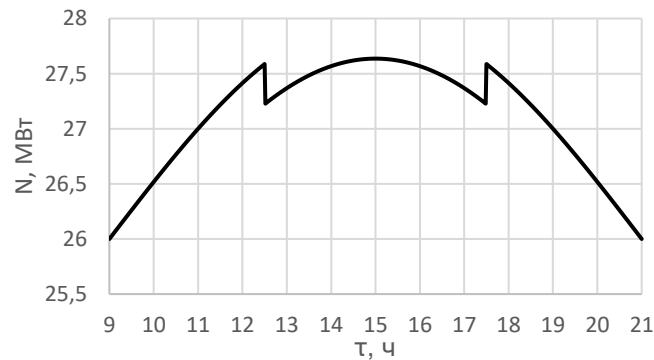


Рис.2 – График почасовой нагрузки при 5-часовой работе контура разрядки

Для анализа влияния процесса разрядки КСНЭ на реальный график потребления электроэнергии необходимо оценить показатели эффективности для выравнивания.

Для этого необходимо определить какими именно критериями можно определить неравномерность выработки. Как правило, для этого используются среднее отклонение мощности, коэффициент вариации, суточный коэффициент неравномерности выработки.

Среднее отклонение мощности σ [МВт] представляет собой среднюю величину отклонения выработки от её среднего значения за период (в случае криогенного аккумулярования в качестве периода как правило используются сутки).

Максимальная скорость изменения мощности [1] R_a [МВт/ч] показывает, насколько быстро может возрастать или падать мощность генерации.

Коэффициент вариации [2] CV показывает относительную степень изменчивости и определяется следующим образом:

$$CV = \frac{\sigma}{N_{cp}},$$

где N_{cp} – среднее значение потребляемой мощности за период.

Суточный коэффициент неравномерности выработки g [3] представляет собой отношение минимальной мощности к максимальной:

$$g = \frac{N_{\min}}{N_{\max}}.$$

На рис. 3 представлен пример графика суточного потребления электроэнергии и влияние на него процесса разрядки криогенного аккумулятора. На графике явно видно два пика потребления, первый в районе 8:00, второй – в районе 19:00. Это означает, что вероятно оптимально будет включать и выключать аккумулятор дважды в районе каждого из пиков. Анализ показал, что минимальное значение мощности достигается при времени работы аккумулятора, равном 8 часам, 5 часов в утренний пик и 3 часа в вечерний.



Рис. 3 – Сравнение графиков нагрузки с и без учета процесса разрядки

Определим показатели графиков и сравним их. Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение графиков нагрузки

Параметр	Значение начального графика	Значение нового графика	Изменение, %
σ , МВт	1,199	0,966	-19,41
Ra , МВт/ч	1,2	1,15	-4,17
CV , %	4,2	3,48	-18,43
g , %	86,8	89,05	2,59

Можно отметить, что показатели неравномерности улучшились. Среднее отклонение и коэффициент вариации уменьшились почти на 20%, а суточный коэффициент неравномерности потребления энергии повысился до 89%, что является хорошим результатом. Наименьшее улучшение получила величина максимальной скорости изменения мощности, что объясняется большим изменением потребления мощности в утренние и вечерние часы.

Список литературы

1. Зботек, Р. Скорость изменения мощности и скорость изменения энергии [Электронный ресурс] / Р. Зботек zbotek.com: Сайт компании ЗБОТЭК. – URL: <https://zbotek.com/ru/ramp-rate-vs-energy-ramp-rate/> (дата обращения: 12.11.2025).
2. Кабиняков, М.Ю. Статистический анализ персистентных временных рядов (на примере потребления электроэнергии) [Текст] / М.Ю. Кабиняков, Ф.Б. Тебугева // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Экономические науки. – 2011. – №6. – С. 213-217.
3. Поликарпова Т.И., Характеристика и структура производственных процессов на энергопредприятиях [Текст] / Т.И. Поликарпова. – Красноярск.: Изд-во СФУ, 2021. – 24 с.

Сведения об авторах

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

Битерякова Екатерина Михайловна – 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.

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

DETERMINATION OF OPTIMAL PARAMETERS OF THE DISCHARGE PROCESS OF A CRYOGENIC ENERGY STORAGE SYSTEM

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

¹Samara University, Samara

Keywords: cryogenic energy storage system; discharge; peak load; installed capacity; two-part tariff; consumption schedule.