

УДК 681.518

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ АККУМУЛЯТОРНЫХ НАКОПИТЕЛЬНЫХ СТАНЦИЙ ДЛЯ ВЫРАВНИВАНИЯ ГРАФИКОВ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Д. И. ЗАЛИЗНЫЙ, А. Э. ЗУЕВ

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого»,
Республика Беларусь*

Предложена методика оценки экономической эффективности применения аккумуляторных накопительных станций для выравнивания графиков электропотребления промышленных предприятий в Республике Беларусь. Методика основана на анализе эквивалентных двухступенчатых графиков электропотребления. Полученные расчетные соотношения позволяют сделать вывод, что уровень и форма графика электропотребления предприятия, а также количество аккумуляторных батарей существенно не влияют на срок окупаемости накопительных станций.

Предложены структурная схема и основные алгоритмы работы аппаратной части системы выравнивания графика электропотребления предприятия.

На основе расчетов, выполненных для предприятия ЗАО «Бобруйский бровар», установлено, что применение аккумуляторных накопительных станций позволит предприятию получать прибыль, однако не является высокоэффективным.

Ключевые слова: накопительная станция, аккумулятор, график электропотребления, график нагрузки, встречное регулирование, экономическая эффективность.

THE EFFICIENCY OF APPLICATION OF BATTERY STORAGE STATIONS FOR ALIGNING THE ELECTRICITY GRAPHS OF INDUSTRIAL ENTERPRISES

D. I. ZALIZNY, A. E. ZUEV

*Educational Institution "Sukhoi State Technical University
of Gomel", the Republic of Belarus*

The methodology of evaluation of the economic efficiency of the use of battery storage stations for the alignment of power consumption graphs of industrial enterprises in the Republic of Belarus is suggested. The methodology is based on the analysis of equivalent two-stage power consumption graphs. The obtained calculated ratios allow us to conclude that the level and shape of the power consumption graph of the enterprise, as well as the number of storage batteries, do not significantly affect the payback period of storage stations.

The block diagram and basic algorithms of the hardware part of the system are proposed for leveling the power consumption graph of the enterprise.

Based on calculations made for the enterprise CJSC "Bobruisky Brovar", it has been established that the use of accumulator storage stations will allow the enterprise to make a profit, but it is not highly efficient.

Keywords: storage station, battery, power consumption graph, current graph, counter regulation, economic efficiency.

Введение

На сегодняшний день в Республике Беларусь большинство промышленных потребителей производят оплату счетов за электроэнергию по двухставочному или двухставочно-дифференцированному тарифам. Эти тарифы обязывают потребителя платить за максимальную получасовую мощность во время пика нагрузок энергосистемы, а также за потребленную электроэнергию в тарифных зонах (ночь, полупик, пик). Стоимость потребленной электроэнергии в различных тарифных зонах различается и зависит от основной и дополнительной ставок тарифа, а также от количества часов в тарифных зонах и дней в расчетном периоде.

Снижение электропотребления от электрической сети во время пика выгодно как предприятию, так и энергосистеме. Для предприятий выгода заключается в снижении затрат на оплату потребленной электроэнергии, а также в улучшении качества электроэнергии. Для белорусской энергосистемы выгода состоит в выравнивании формы графика электрической нагрузки, что снижает значение потерь в электрических сетях, а также позволит более корректно эксплуатировать готовящуюся к вводу атомную электростанцию.

Существует два основных метода выравнивания графиков электропотребления – горизонтальное маневрирование и встречное регулирование. В данной статье рассматривается второй метод с применением накопительных станций, способных запасать электроэнергию в ночные часы и выдавать ее потребителям в часы пика. В качестве накопителей предлагается использовать аккумуляторные батареи, эффективность которых ежегодно возрастает, а стоимость снижается.

Цель исследований – разработать методику оценки экономической эффективности применения аккумуляторных накопительных станций для выравнивания графиков электропотребления промышленных предприятий в Республике Беларусь, а также предложить структуру аппаратной части автоматической системы управления накопительными станциями.

Аналитический обзор источников литературы

Необходимость выравнивания графиков электропотребления для улучшения работы энергосистемы изложена в [1], а в [2] – для повышения энергоэффективности предприятий.

В [3]–[5] рассмотрены виды накопителей электроэнергии. Приоритет отдается в основном аккумуляторным и конденсаторным накопителям.

В российских научных публикациях изучаемая проблема наиболее полно изложена в диссертации [6]. Среди учебников основным по данной тематике является [7]. В обоих источниках рассматриваются способы применения аккумуляторных накопительных станций, однако отсутствуют методики оценки их экономической эффективности в условиях многотарифной системы оплаты за потребленную электроэнергию и способы построения аппаратной части с учетом современного уровня техники.

Методика расчета экономической эффективности применения аккумуляторных накопительных станций

В соответствии с [8] промышленные и приравненные к ним потребители с присоединенной мощностью 750 кВА и более должны осуществлять основную плату за максимальную потребленную активную мощность в часы максимума нагрузок энергосистемы и дополнительную плату за электроэнергию. Для анализа экономической эффективности применения аккумуляторных накопительных станций будем рассматривать эквивалентные двухступенчатые суточные графики электропотребления предприятия от питающей электрической сети без применения накопительных станций (рис. 1, *а*) и с ними (рис. 1, *б*).

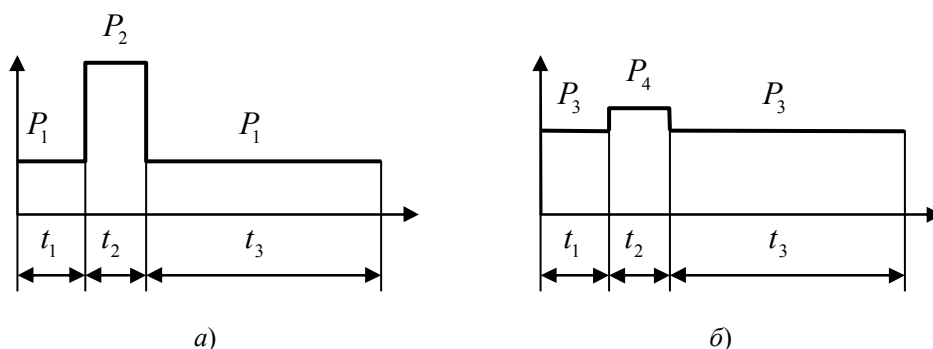


Рис. 1. Эквивалентные двухступенчатые суточные графики электропотребления:
 а – без применения накопительных станций; б – с применением накопительных станций

Идея применения накопительных станций заключается в накоплении электроэнергии в интервалы времени t_1 , t_3 и отдаче накопленной энергии потребителям в интервал времени t_2 с одновременным отключением этих потребителей от электрической сети. В результате значения мощностей P_1 увеличатся до значений P_3 , а значения пиковой мощности P_2 снизятся до значений P_4 . Таким образом, общее увеличение потребления электроэнергии будет скомпенсировано снижением ее потребления в часы максимума, что и должно дать экономический эффект.

В соответствии с [8] и рис. 1, а плата за потребленную электроэнергию Π_1 без применения накопительных станций в течение суток будет равна

$$\Pi_1 = (P_1(t_1 + t_3) + P_2 t_2) b + P_2 a, \quad (1)$$

где a , b – коэффициенты, характеризующие стоимость электроэнергии: a – основная ставка тарифа, р./Вт; b – дополнительная ставка тарифа, р./Вт · с.

Примем соотношения:

$$P_4 = \alpha P_2; \quad P_3 = \beta P_1; \quad \alpha < 1; \quad \beta > 1, \quad (2)$$

где α , β – коэффициенты пропорциональности.

Тогда плата за потребленную суточную электроэнергию Π_2 с применением накопительных станций в соответствии с [8] и рис. 1, б будет определяться по формуле

$$\Pi_2 = (P_3(t_1 + t_3) + P_4 t_2) b + P_4 a = (\beta P_1(t_1 + t_3) + \alpha P_2 t_2) b + \alpha P_2 a. \quad (3)$$

Далее можно рассчитать экономический эффект:

$$\mathcal{E} = (\Pi_1 - \Pi_2) n_{\text{сут}} - \Pi_{\text{об}}, \quad (4)$$

где $n_{\text{сут}}$ – количество суточных интервалов; $\Pi_{\text{об}}$ – плата за установленное оборудование накопительной станции, его монтаж, амортизационные расходы и т. д., р.

Подставив выражения (1) и (3) в (4), после преобразований получим:

$$\mathcal{E} = (1 - \beta) P_1 (t_1 + t_3) b n_{\text{сут}} + (1 - \alpha) P_2 (t_2 b + a) n_{\text{сут}} - \Pi_{\text{об}}. \quad (5)$$

Из (2) следует, что первое слагаемое в выражении (5) будет отрицательным, а второе – положительным. Следовательно, для достижения положительного экономического эффекта должно выполняться соотношение

$$(1-\alpha)P_2(t_2 b + a)n_{\text{сут}} > (1-\beta)P_1(t_1 + t_3)bn_{\text{сут}} + \Pi_{\text{об}}. \quad (6)$$

Для дальнейшего упрощения выражения (6) рассмотрим баланс энергий, который следует из эквивалентных графиков на рис. 1. Этот баланс определяется таким образом: количество энергии, запасенное накопительными аккумуляторами за время $t_1 + t_3$, должно быть равно количеству энергии, отданному за время пика t_2 , или

$$(P_2 - P_4)t_2 = (P_3 - P_1)(t_1 + t_3). \quad (7)$$

С учетом обозначений (2) формула (7) преобразуется к виду:

$$(1-\alpha)P_2 t_2 = -(1-\beta)P_1(t_1 + t_3). \quad (8)$$

Выразив из (8) $(1-\alpha)P_2$ и подставив полученное выражение в неравенство (6), после преобразований получим:

$$P_1(\beta-1)(t_1 + t_3)\left(2b + \frac{a}{t_2}\right)n_{\text{сут}} > \Pi_{\text{об}}. \quad (9)$$

Далее предположим, что затраты на оборудование $\Pi_{\text{об}}$ пропорциональны энергии, которую должны запасть аккумуляторы за время $t_1 + t_3$. Это связано с тем, что чем выше емкость аккумуляторов, тем выше их стоимость и стоимость остального оборудования. Итак, примем допущение:

$$\Pi_{\text{об}} = K(P_3 - P_1)(t_1 + t_3) = K P_1(\beta-1)(t_1 + t_3), \quad (10)$$

где K – удельная стоимость накопительных станций, р./Вт · с.

Подставив (10) в (9), после упрощений запишем:

$$\left(2b + \frac{a}{t_2}\right)n_{\text{сут}} > K. \quad (11)$$

Неравенство (11) демонстрирует основные параметры, влияющие на срок окупаемости накопительных станций. Это – стоимость электроэнергии, длительность интервала пиковых нагрузок энергосистемы и удельная стоимость оборудования накопительных станций.

Из неравенства (11) можно сделать кажущийся на первый взгляд парадоксальным вывод: уровень и форма графика электропотребления предприятия, а также количество аккумуляторных батарей существенно не влияют на срок окупаемости накопительных станций.

Структура аппаратной части системы выравнивания графика электропотребления предприятия

Аппаратная часть накопительных станций и автоматической системы их коммутаций для выравнивания графика электропотребления предприятия должна содержать структурные блоки в соответствии с рис. 2.

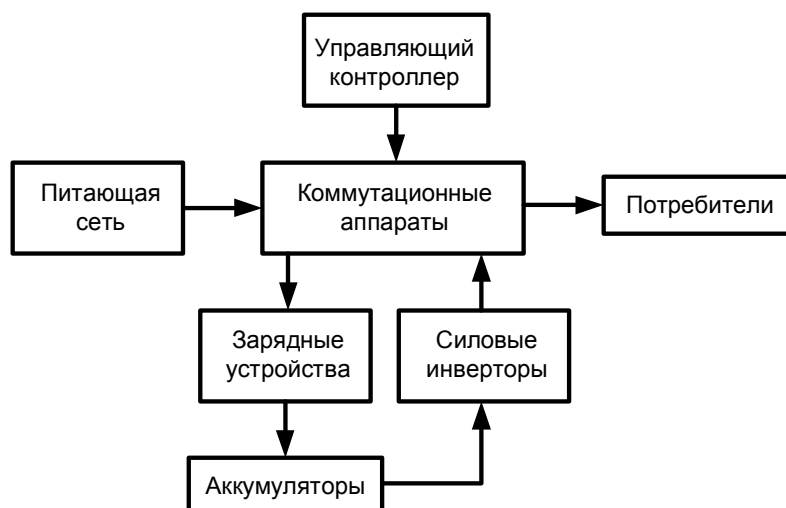


Рис. 2. Структурная схема системы выравнивания графика электропотребления предприятия

В требуемые моменты времени управляющий контроллер выполняет переключение коммутационных аппаратов в соответствии с двумя режимами: накопление электроэнергии и выдача электроэнергии.

В режиме накопления питающая сеть подключается одновременно к потребителям и к зарядным устройствам, осуществляющим зарядку аккумуляторных батарей.

В режиме выдачи постоянное напряжение с аккумуляторных батарей преобразуется в переменное напряжение электрической сети силовыми инверторами. Для предотвращения возникновения провалов напряжения у потребителей коммутационные аппараты вначале должны подключить выходы силовых инверторов параллельно питающей сети. При этом напряжение, выдаваемое инверторами, должно быть синхронизировано с сетью. Затем коммутационные аппараты отключают часть потребителей от питающей сети, и потребление электроэнергии осуществляется от аккумуляторных батарей. Необходимо отключать такое количество потребителей, которое приведет к максимальному выравниванию графика электропотребления от питающей сети.

Очевидно, что рассматриваемая автоматическая система может быть реализована только на стороне низкого напряжения питания потребителей.

Пример расчета экономической эффективности применения аккумуляторных накопительных станций

Рассмотрим пример расчета для ЗАО «Бобруйский бровар». Это предприятие имеет характерный суточный график электропотребления с явно выраженным максимумом (рис. 3).

На графике наблюдается утренний пик в часы максимума нагрузок энергосистемы, т. е. с 8:00 до 11:00. Из графика видно, что необходимо скомпенсировать около 400 кВт мощности.

В качестве накопителей примем аккумуляторные батареи *Delta DTM 12250* с напряжением 12 В и емкостью 250 А · ч. Для компенсации 400 кВт мощности потребуется 30 блоков по 20 последовательно соединенных батарей в каждом блоке, что в сумме составит около 920000 р. Приняв стоимость остальных устройств накопительной станции около 15 % от стоимости аккумуляторов, получим общую стоимость станции приблизительно 1100000 р.

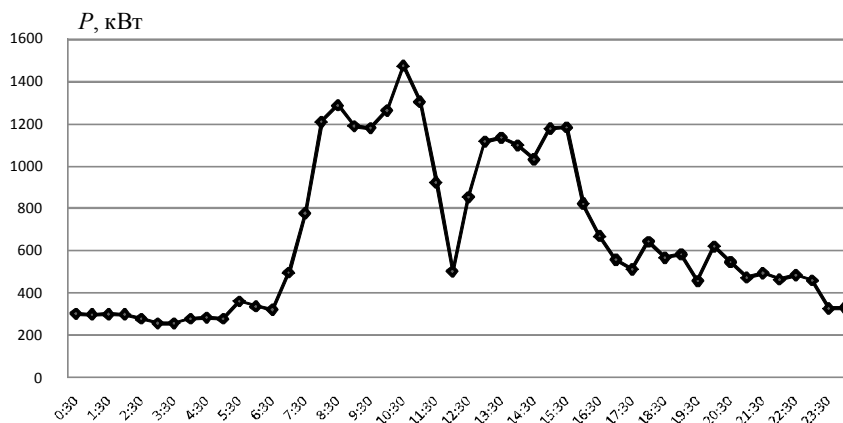


Рис. 3. Суточный график электропотребления ЗАО «Бобруйский бровар»

Пусть накопление электроэнергии осуществляется в часы ночного минимума на-грузок энергосистемы, т. е. с 23:00 до 6:00, а выдача с 8:00 до 11:00. В результате получим график электропотребления (рис. 4).

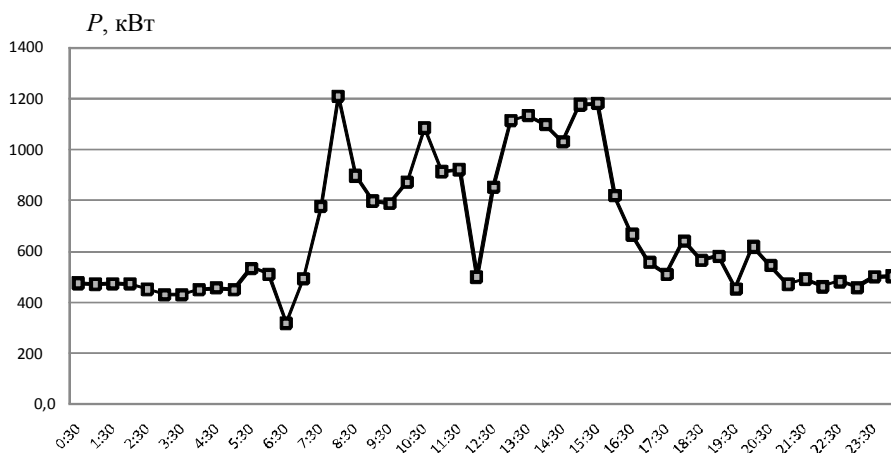


Рис. 4. Расчетный суточный график электропотребления ЗАО «Бобруйский бровар» после применения аккумуляторной накопительной станции

Из этого графика видно, что в ночные часы произошел рост электропотребления, а в часы пика – снижение электропотребления.

Коэффициент максимума (отношение максимальной мощности к средней мощности) для графика на рис. 3 составляет 2,21, а для графика на рис. 4 он равен 1,81. Это свидетельствует о достаточно серьезном уровне выравнивания графика.

Для рассматриваемого примера расчетный срок окупаемости равен 6,3 года. После достижения окупаемости доход предприятия будет составлять около 170000 р. в год.

При изменении количества используемых аккумуляторных батарей, как в сторону увеличения, так и в сторону снижения, срок окупаемости практически не изменяется, что согласуется с выводами из выражения (11).

Полученное значение срока окупаемости достаточно велико и сравнимо со сроком службы аккумуляторных батарей. В связи с этим на сегодняшний день в Республике Беларусь применение аккумуляторных накопительных станций для выравнивания графиков электропотребления предприятий нельзя назвать высокоэффективным. Для увеличения эффективности в будущем должны выполняться следующие условия:

- снижение стоимости аккумуляторных батарей;
- увеличение сроков службы аккумуляторных батарей;
- получение предприятием доплат от энергосистемы за выравнивание формы графика нагрузки.

Заключение

В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. В Республике Беларусь актуальной является задача выравнивания графиков электропотребления промышленных предприятий.
2. Аккумуляторные накопительные станции наиболее перспективны для выравнивания графиков электропотребления промышленных предприятий в случае применения встречного регулирования.
3. Уровень и форма графика электропотребления предприятия, а также количество аккумуляторных батарей существенно не влияют на срок окупаемости накопительных станций.
4. На сегодняшний день в Республике Беларусь применение аккумуляторных накопительных станций для выравнивания графика электропотребления позволит предприятию получать прибыль, но не является высокоэффективным.
5. Для повышения эффективности применения аккумуляторных накопительных станций в будущем необходимо выполнить ряд условий: снижение стоимости и увеличение сроков службы аккумуляторных батарей, доплаты от энергосистемы и др.

Литература

1. Маляренко, В. А. Неравномерность графика нагрузки энергосистемы и способы ее выравнивания / В. А. Маляренко, И. Е. Нечмоглод // Светотехника и электроэнергетика. – 2011. – № 4. – С. 61–66.
2. Серебренников, Б. С. Повышение энергетической эффективности технологических процессов промышленных предприятий / Б. С. Серебренников, Е. Г. Петрова // Энергосбережение, энергетика, энергоаудит. – 2013. – № 1. – С. 15–20.
3. Смоленцев, Н. И. Накопители энергии в локальных электрических сетях / Н. И. Смоленцев // Ползунов. вестн. – 2013. – № 4. – С. 176–181.
4. Алексеев, Б. А. Применение накопителей энергии в электроэнергетике / Б. А. Алексеев // Электро. – 2005. – № 2. – С. 48–52.
5. Перспективы применения накопителей электроэнергии для сетей электроснабжения 0,4 кВ / Е. В. Раубаль [и др.] // Вестн. Моск. энергет. ин-та. – 2013. – № 3. – С. 55–57.
6. Брагин, А. А. Алгоритм формирования графиков электрических нагрузок предприятия с применением аккумуляторных батарей в качестве потребителей-регуляторов мощности : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03 / А. А. Брагин ; Нац. минер.-сырьевой ун-т «Горный». – СПб., 2013. – 21 с.
7. Астахов, Ю. Н. Накопители энергии в электрических системах : учеб. пособие / Ю. Н. Астахов, В. А. Веников, А. Г. Тер-газарян. – М. : Высш. шк., 1989. – 159 с.
8. Декларация об уровне тарифов на электрическую энергию, отпускаемую республиканскими унитарными предприятиями электроэнергетики ГПО «Белэнерго» для юридических лиц и индивидуальных предпринимателей : зарегистрировано приказом М-ва антимоноп. регулирования и торговли Респ. Беларусь от 31.01.2020 г. № 21.

Получено 21.05.2020 г.