

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМА ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ НА СНИЖЕНИЕ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ С НАКОПИТЕЛЕМ ЭНЕРГИИ

Евгений Александрович Извеков
Юрий Михайлович Помогаев

Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I

Проанализированы мероприятия, направленные на рациональное использование электрической энергии потребителями. Выявлены способы выравнивания графиков нагрузки потребителей. Обоснована целесообразность применения систем накопления энергии для регулирования графиков нагрузки производственных сельскохозяйственных потребителей. Рассчитано место размещения накопителя энергии в вводно-распределительном устройстве потребителя. Предложена структурная схема взаимодействия накопителя энергии, электросети и электроприемников потребителя в разных режимах потребления электрической энергии. Выявлена целесообразность применения метода расчета режима характерных суток при расчете потерь электрической энергии в сетях, питающих производственных сельскохозяйственных потребителей. Предложены параметры, характеризующие эффект снижения потерь в электрической сети при использовании системы накопления энергии. Для графиков нагрузки с различными коэффициентами формы проведены вычислительные эксперименты по определению потерь электрической энергии в рассматриваемом процессе. Получены графические зависимости снижения потерь электрической энергии от относительной емкости накопителя энергии для графиков нагрузки с различными коэффициентами формы. Получены выражения для определения максимального эффекта снижения потерь электрической энергии. Установлено, что применение систем накопления энергии наиболее эффективно для потребителей с явно выраженной пиковой нагрузкой, например доильно-молочных блоков и кормоцехов животноводческих комплексов. Установлено, что применение систем накопления энергии наиболее удобно для потребителей, имеющих однотипный график нагрузки. Установлено, что эффект снижения потерь существенно зависит от КПД преобразования энергии в накопителе энергии. Предложена идея разработки расчетного модуля, управляющего системой накопления энергии, на основании анализа параметров графика нагрузки по статистическим данным энергопотребления прошлых дней.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: электрическая энергия, накопитель электрической энергии, система накопления электрической энергии, потери электрической энергии, электрическая сеть.

ANALYSIS OF THE IMPACT OF ELECTRIC POWER CONSUMPTION PATTERNS ON REDUCING THE ELECTRIC POWER LOSSES IN THE ELECTRIC NETWORK WITH A POWER STORAGE UNIT

Evgeniy A. Izvekov
Yuriy M. Pomogaev

Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great

The authors analyzed the measures aimed at the rational use of electric power by consumers; identified the ways to align the consumer load curves; substantiated the expediency of using energy storage systems to regulate the load charts of industrial agricultural consumers; calculated the location of the power storage unit in the input distribution device of the consumer. A flow chart is proposed to describe the interactions of the power storage unit, the electric network, and current-using equipment of consumers in different modes of electric energy consumption. The authors revealed the expediency of applying the method of calculating the typical daily pattern when calculating the losses of electric power in the networks supplying the industrial agricultural consumers. The parameters are proposed to characterize the effect of reducing the losses in the electric network using the electric power storage system. For load patterns with different shape coefficients the computational experiments were carried out to determine the losses of electric power in the process under consideration. The authors obtained the

graphic dependences of reduction of electric power losses on the relative capacity of the power storage unit for load patterns with different shape coefficients. Expressions for determining the maximum effect of reducing electric power losses were derived. It was established that the use of power storage systems was most efficient for consumers with a well-defined peak load, e.g. dairy milking blocks and feed processing buildings in livestock breeding complexes. It was also established that the use of power storage systems was most convenient for consumers with a similar load pattern, and the effect of reducing the losses significantly depends on the efficiency of energy conversion in the power storage unit. The authors proposed an idea to develop a design module that would manage the power storage system basing on the analysis of load pattern parameters by historic statistical data of energy consumption.

KEYWORDS: electric power, electric power storage unit, electric power storage system, electric power losses, electric network.

Электрическая сеть, осуществляющая передачу и распределение электрической энергии, требует для своего функционирования определенных затрат энергии, которые выражаются в виде технологического расхода электроэнергии на ее передачу и складываются из затрат электроэнергии на собственные нужды электрической сети и потерь электроэнергии в элементах сети [9]. Потери электроэнергии непосредственно влияют на экономические показатели функционирования энергосистем, так как напрямую связаны с необходимостью дополнительной выработки электроэнергии на электростанциях, что, в свою очередь, требует дополнительных затрат топлива [10]. Экономия электроэнергии за счет снижения расхода электроэнергии на ее передачу является насущной задачей всех электроснабжающих организаций [4]. С этой целью они разрабатывают и реализуют мероприятия, структура которых приведена на рисунке 1.

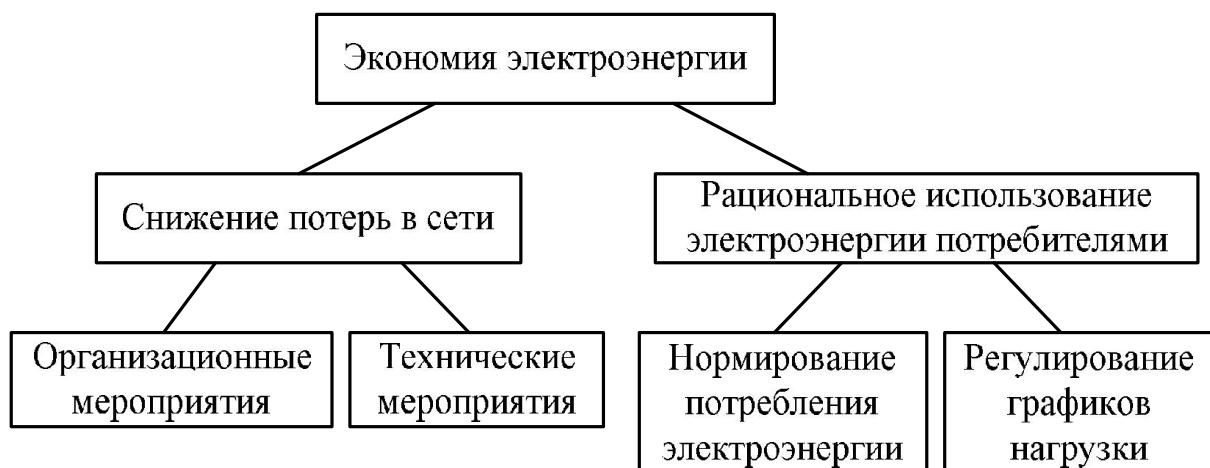


Рис. 1. Структура мероприятий по экономии электроэнергии

Рациональное использование электроэнергии потребителями, связанное с нормированием потребления, то есть с ограничением (экономией) потребления электроэнергии, бесперспективно, так как все потребители, как бытовые, так и производственные, демонстрируют устойчивое увеличение потребления электроэнергии, вследствие общей тенденции увеличения энергоемкости и энерговооруженности как производственных процессов, так и бытового сектора [1].

Более перспективным направлением рационализации использования электроэнергии потребителями следует считать регулирование графиков нагрузки с целью их выравнивания [6]. Для выравнивания графиков рекомендуются следующие мероприятия.

1. Включать меньше электроприемников в часы максимума и загружать сеть в часы снижения нагрузки (например, вочные часы). Для стимулирования данного ме-

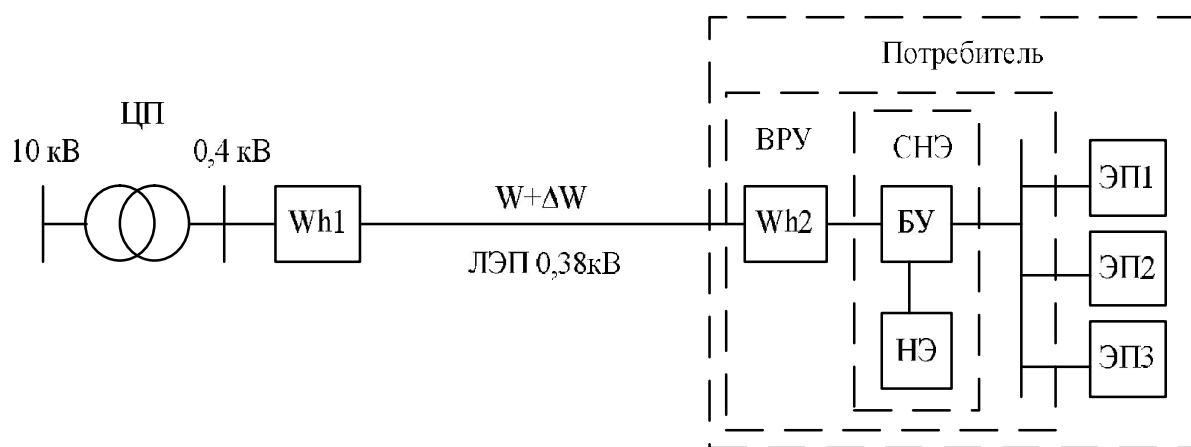
роприятия вводятся многоставочные тарифы [8]. Однако зачастую это крайне неудобно, особенно для бытовых потребителей, так как нарушает сложившийся ритм жизни и/или производства. Для некоторых производств, жестко привязанных ко времени суток, это вообще невозможно. Например, технологические процессы доения и кормо-приготовления на животноводческих комплексах осуществляются строго в определенное время [7], сдвинуть их не представляется возможным.

2. Применять системы накопления энергии (СНЭ) [3]. Это удобно, так как не требует от потребителей изменения жизненного (технологического) цикла и в то же время позволяет в полной мере использовать все преимущества многоставочного тарифа.

От использования систем накопления энергии при многоставочном тарифе выигрывает не только потребитель, который может сэкономить на оплате за электроэнергию [5], но и электроснабжающая организация, так как установка накопителя энергии конечным потребителем позволяет снизить потери в питающей его сети.

Попробуем оценить эффект снижения потерь от применения СНЭ с точки зрения электроснабжающей организации.

Наиболее удобным местом расположения накопителя энергии следует считать вводно-распределительное устройство потребителя, когда накопитель энергии, расположенный в вводном щите, занимает промежуточное положение между питающей линией электропередач (ЛЭП) и электроприемниками потребителя (рис. 2).



Если подключить НЭ непосредственно на вводе к потребителю, то расчет снижения потерь можно вести только для питающей ЛЭП 0,4 кВ, загруженность которой на 100% определяется режимом работы потребителя. Учет в расчетах потерь в ЛЭП более высокого напряжения нецелесообразен, так как ЦП питает множество ЛЭП, вследствие чего влияние отдельного потребителя на потери в ЛЭП высокого напряжения нивелируется [9].

Принцип работы СНЭ показан на рисунке 3.

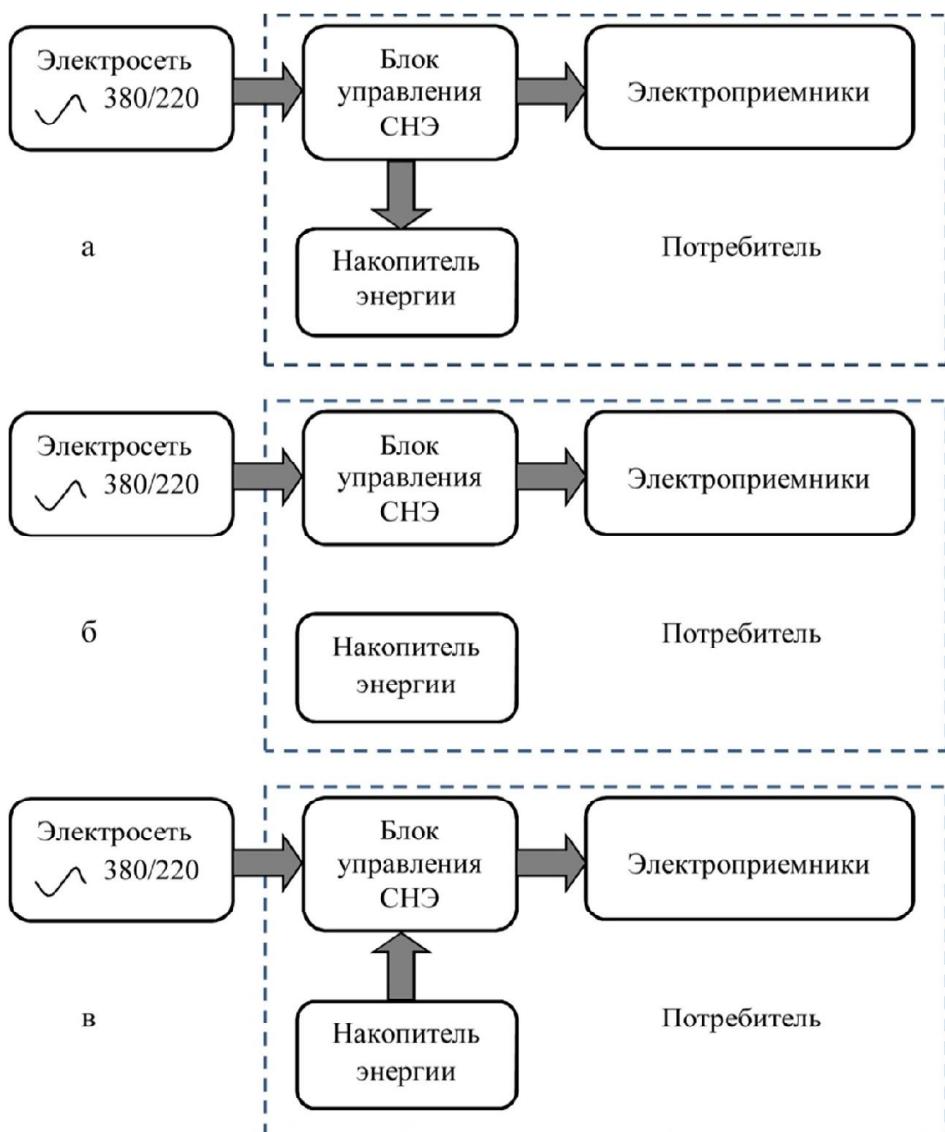


Рис. 3. Схема работы СНЭ:
 а – период снижения потребления электроэнергии;
 б – период среднего потребления электроэнергии;
 в – период максимального потребления электроэнергии

При снижении нагрузки электроприемников блок управления БУ переводит накопитель энергии НЭ в режим зарядки, и электроэнергия, поступая из сети в накопитель энергии НЭ, заряжает его (рис. 3, а). При нагрузках, близких к средним, накопитель энергии НЭ отключается, и электроэнергия поступает только к электроприемникам ЭП (рис. 3, б). При максимуме нагрузки накопитель энергии НЭ переходит в режим источника питания и отдает электроэнергию электроприемникам ЭП, тем самым разгружая ЛЭП (рис. 3, в). При отсутствии накопителя энергии у потребителя линия работает с переменной нагрузкой, но с большим максимумом, то есть с большими потерями. При использовании накопителя энергии линия загружена более равномерно, имеет меньший максимум, то есть работает с меньшими потерями.

Как следует из рисунка 3 (позиция в), мощность СНЭ следует ограничить мощностью работающих электроприемников, в противном случае возможен противоток от потребителя в ЛЭП, то есть от накопителя энергии в электрическую сеть, что создаст путаницу в расчетах за электроэнергию между электроснабжающей организацией и потребителем.

Результаты сравнения величины снижения потерь электроэнергии ΔW в ЛЭП при применении накопителя энергии с потерями без накопителя энергии не позволяют однозначно ответить на вопрос, снижаются ли суммарные потери в ЛЭП при применении накопителя энергии или нет? Ответ неоднозначный, так как в самом накопителе энергии тоже имеются потери. Если считать потери холостого хода в ЛЭП 0,4кВ незначительными [2], а все потери нагрузочными, то суточные нагрузочные потери электроэнергии в ЛЭП при неизменных активном сопротивлении R и напряжении U можно определить по выражению

$$\Delta W = 3R \int_0^T I^2(t)dt = \frac{R}{U^2} \int_0^T S^2(t)dt,$$

где I, S – ток и мощность в ЛЭП в момент времени t ;

T – рассматриваемый период времени.

Однако описать изменение параметров $I^2(t)$ и $S^2(t)$ аналитической функцией даже за сутки, а тем более за год, представляется весьма затруднительным. Поэтому при расчете нагрузочных потерь электроэнергии прибегают к различным допущениям и упрощениям, на базе которых разработаны многочисленные методы расчета. Например, можно применить метод, основанный на расчете режима характерных суток [2].

Для выбранных суток составляют график нагрузок, который представляют в виде ступенчатых линий, причем на каждой ступени графика нагрузка остается неизменной (рис. 4). Тогда потери электроэнергии за соответствующие характерные сутки можно определить по формуле

$$\Delta W = \sum_{i=1}^n \Delta P_i t_i = 3R \sum_{i=1}^n I_i^2 t_i = \frac{R}{U^2} \sum_{i=1}^n S_i^2 t_i,$$

где I_i, S_i – ток и мощность на i -й ступени графика нагрузки;

t_i – продолжительность ступени;

n – число ступеней суточного графика.

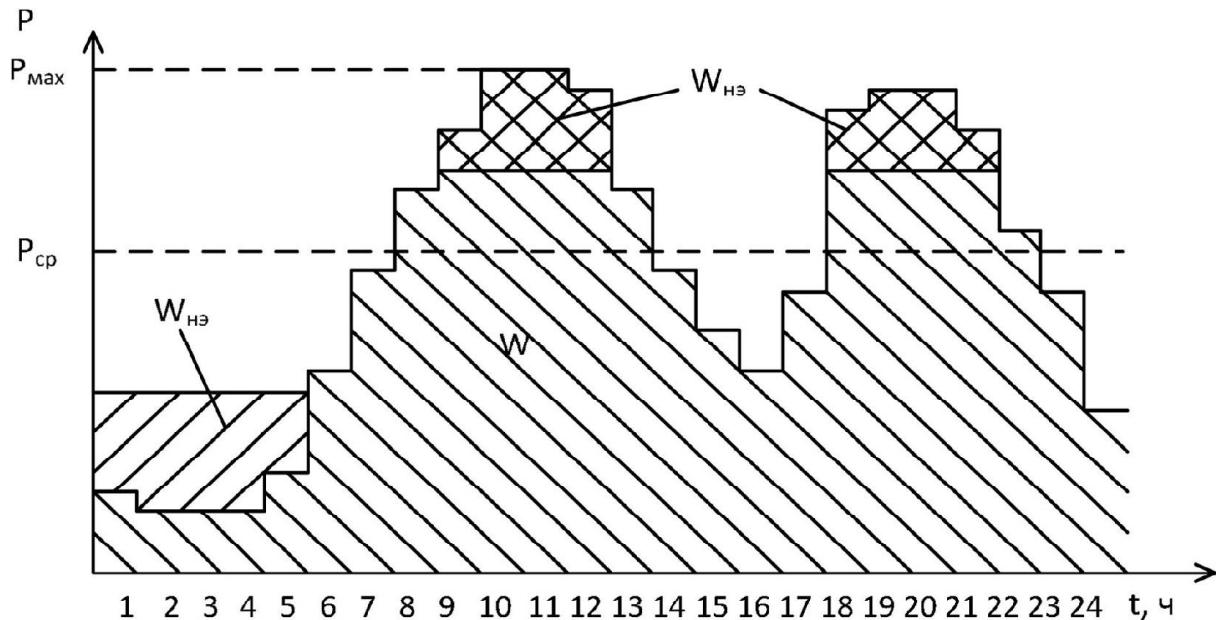


Рис. 4. График нагрузки

Основной недостаток такого подхода заключается в трудности обоснования каждого характерного режима и особенно его продолжительности при расчете месяч-

ных и годовых потерь электроэнергии. Данный недостаток существенно обостряется при анализе режимов потребления электроэнергии со сложно предсказуемой нагрузкой, например бытовыми потребителями. Однако для производственных сельскохозяйственных объектов он дает точные результаты, так, например, доильно-молочный блок или кормоприготовительный цех при беспривязном круглогодичном содержании КРС имеет однотипный режим работы в течение всего года. То есть месячные и годовые потери можно определить, используя всего один характерный график нагрузки.

Для анализа эффективности работы СНЭ воспользуемся общепринятыми параметрами графиков нагрузки, а также введем следующие дополнительные параметры, характеризующие эффект снижения потерь при использовании СНЭ.

1. Коэффициент заполнения графика

$$k_3 = \frac{P_{CP}}{P_{MAX}} \leq 1,$$

где P_{MAX} – максимальная мощность нагрузки, кВт;

P_{CP} – средняя мощность нагрузки, кВт.

2. Коэффициент формы графика

$$k_\Phi = \frac{P_{CK}}{P_{CP}} \geq 1,$$

где P_{CK} – среднеквадратичная нагрузка, кВт.

Чем равномернее, плотнее электропотребление, тем ближе коэффициенты k_3 и k_Φ к единице, соответствующей неизменной нагрузке. С ростом неравномерности графика, т. е. при его пиковом характере, значение k_Φ возрастает, а k_3 уменьшается.

3. Снижение потерь электроэнергии без учета потерь в НЭ

$$K_1 = \left(1 - \frac{\Delta W_{c\text{ НЭ}}}{\Delta W_{\text{без НЭ}}} \right) \cdot 100\%,$$

где $\Delta W_{c\text{ НЭ}}$ – потери электроэнергии в ЛЭП при использовании СНЭ, кВт·ч;

$\Delta W_{\text{без НЭ}}$ – потери электроэнергии в ЛЭП без использования СНЭ, кВт·ч.

4. Снижение потерь электроэнергии с учетом потерь в НЭ

$$K_2 = \left(1 - \frac{\Delta W_{c\text{ НЭ}} + W_{\text{НЭ}}(1 - \eta)}{\Delta W_{\text{без НЭ}}} \right) \cdot 100\%,$$

где $W_{\text{НЭ}}$ – используемая емкость НЭ, кВт·ч;

η – КПД СНЭ, зависящий от потерь при преобразовании переменного тока в постоянный саморазряд накопителя энергии и потерь при инвертировании постоянного тока в переменный. Если накопление и отдача энергии происходят за короткий срок (несколько часов), то саморазряд накопителя энергии можно не учитывать, так как он будет незначителен по отношению к потерям двойного преобразования энергии.

5. Относительная емкость накопителя энергии

$$E = \frac{W_{\text{НЭ}}}{W} \cdot 100\%,$$

где $W_{\text{НЭ}}$ – используемая емкость накопителя, кВт·ч;

W – потребление электроэнергии за рассматриваемый период, кВт·ч.

Вычислительные эксперименты по определению потерь электроэнергии в рассматриваемом процессе проводились при следующих условиях.

1. Напряжение питающей сети не изменяется $U = \text{const}$.

2. Коэффициент мощности нагрузки постоянный $\cos\varphi = \text{const}$.

3. Количество электроэнергии, потребленной за один суточный технологический цикл, не изменяется $W = \text{const}$.

4. Сумма мощностей одновременно работающих электроприемников хотя бы раз за исследуемый суточный период равна максимальной (расчетной) мощности $P = P_{\text{MAX}}$ и никогда не превышает ее, так как она ограничена допустимым током ЛЭП.

5. Количество электроэнергии, запасенной накопителем энергии из сети в период снижения потребления электроэнергии $W_{\text{НЭзаряд}}$, равно количеству электроэнергии, отданной накопителем энергии электроприемникам в период максимального потребления электроэнергии $W_{\text{НЭразряд}}$

$$W_{\text{НЭзаряд}} = W_{\text{НЭразряд}} = W_{\text{НЭ}}.$$

Приняв эти допущения, можно утверждать следующее.

1. Средняя мощность нагрузки не изменяется $P_{\text{CP}} = W/T = \text{const}$, т. к. $T = \text{const} = 24$ часа и $W = \text{const}$.

2. Коэффициент заполнения графика не изменяется и не зависит от коэффициента формы графика $k_3 = P_{\text{CP}} / P_{\text{MAX}} = \text{const}$, т. к. P_{CP} и P_{MAX} не изменяются.

Используя принятые допущения, удобно проводить расчет для любого конкретного потребителя, зная характерные параметры графика нагрузки, максимум потребляемой мощности P_{MAX} и потребленную электроэнергию за суточный технологический цикл $W_{\text{сут}}$, которую легко определить, разделив потребление электроэнергии за месяц на число дней месяца. Учет этих параметров на предприятии ведется систематически и, даже в условиях неопределенности информации о нагрузках, их поиск не составит труда.

Результаты вычислительных экспериментов, проведенных для графиков нагрузки с различными коэффициентами формы k_{Φ} , представлены кривыми на рисунках 5, 6, 7.

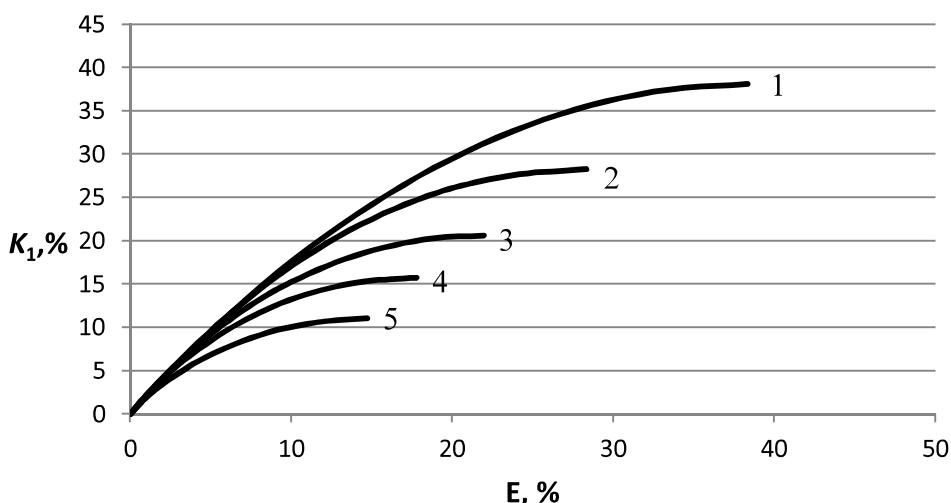


Рис. 5. Зависимость снижения потерь электроэнергии в ЛЭП от используемой емкости НЭ без учета потерь в НЭ ($\eta = 100\%$)
1 – $k_{\Phi} = 1,06$; 2 – $k_{\Phi} = 1,09$; 3 – $k_{\Phi} = 1,12$; 4 – $k_{\Phi} = 1,18$; 5 – $k_{\Phi} = 1,27$

Анализ результатов расчета показывает, что все кривые на рисунке 5 начинаются от нуля, что соответствует исходному (максимальному) коэффициенту формы k_{Φ} , и заканчиваются крайними точками, соответствующими полному выравниванию графика нагрузки, то есть $k_{\Phi} = 1$. Для большего выравнивания графика нагрузки требуется увеличение используемой емкости накопителя энергии, при этом эффект снижения потерь увеличивается до величины, определяемой выражением

$$K_{1\text{MAX}} = \left(1 - \frac{n \cdot I_{\text{cp}}^2}{\sum_{i=1}^n I_i^2} \right) \cdot 100\% = \left(1 - \frac{n \cdot k_3^2}{\sum_{i=1}^n k_{\text{загр}}^2} \right) \cdot 100\%,$$

где $k_{\text{загр}}$ – коэффициент загрузки i -й ступени графика нагрузки.

Величина $K_{1\text{MAX}}$ соответствует минимально возможным потерям в ЛЭП

$$\Delta W_{min} = 3RI_{cp}^2 T = \frac{R}{U^2} S_{cp}^2 T,$$

где I_{cp} , S_{cp} – средний ток и средняя мощность суточного графика нагрузки;

T – рассматриваемый период времени, который для суточного графика нагрузки составляет 24 часа.

Из кривых следует вывод, что показания счетчика Wh1 будут минимальными при максимальном использовании емкости накопителя энергии, то есть при полном выравнивании графика нагрузки, а это значит, что для электроснабжающей организации выгодно, чтобы потребитель использовал накопитель энергии на максимум, так как на нее ложится оплата разницы показаний счетчиков и ей выгодно реализовывать мероприятия по снижению показаний счетчика Wh1 и увеличению показаний счетчика Wh2. Однако с точки зрения потребителя в расчетах следует учитывать потери при преобразовании электроэнергии в накопителе энергии, что приводит к снижению эффекта и даже может дать отрицательный результат (рис. 6, 7).

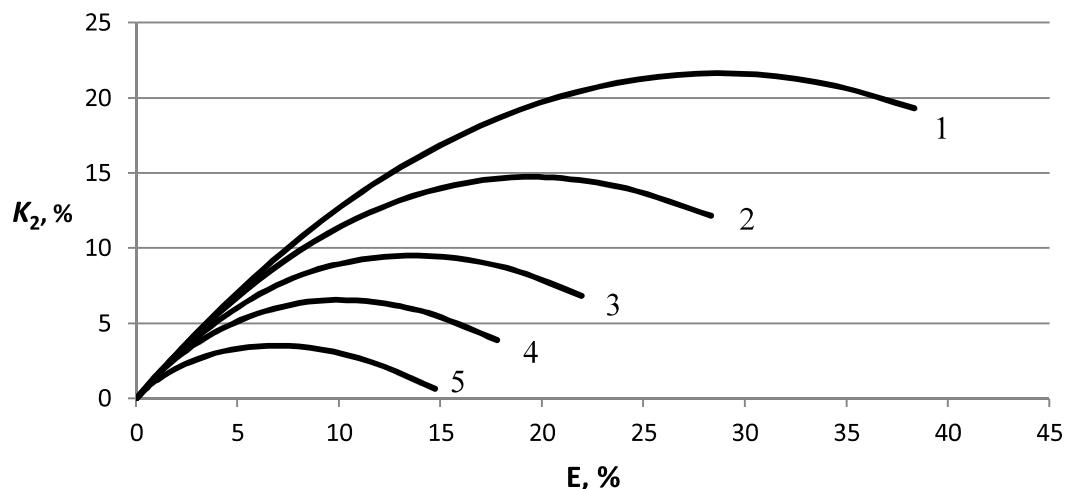


Рис. 6. Зависимость снижения потерь электроэнергии в ЛЭП от используемой емкости НЭ с учетом потерь в НЭ ($\eta \neq 100\%$):
1 – $k_\Phi = 1,06$; 2 – $k_\Phi = 1,09$; 3 – $k_\Phi = 1,12$; 4 – $k_\Phi = 1,18$; 5 – $k_\Phi = 1,27$

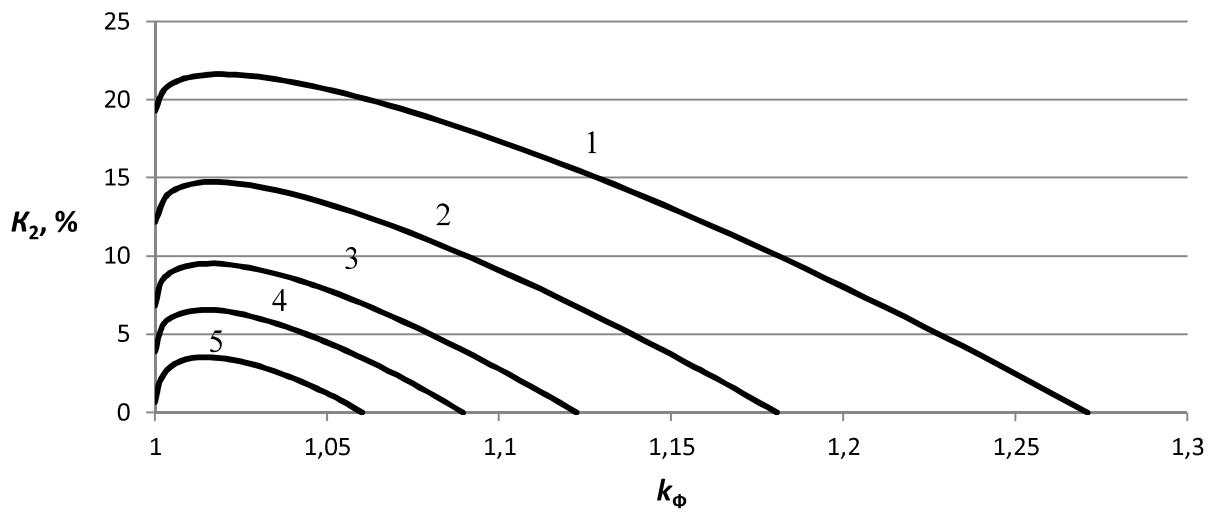


Рис. 7. Зависимость снижения потерь электроэнергии в ЛЭП от степени сглаживания исходного графика нагрузки:
1 – $k_\Phi = 1,06$; 2 – $k_\Phi = 1,09$; 3 – $k_\Phi = 1,12$; 4 – $k_\Phi = 1,18$; 5 – $k_\Phi = 1,27$

Кривые на рисунках 6 и 7, построенные при условии, что КПД накопителя энергии не равен 100%, имеют явно выраженный максимум $K_{2\max}$, соответствующий минимуму суммарных потерь в рассматриваемой системе

$$\Delta W = \Delta W_{c\text{ нэ}} + \Delta W_{\text{нэ}} \rightarrow \min,$$

где $\Delta W_{\text{нэ}}$ – потери в накопителе энергии, определяемые по выражению

$$\Delta W_{\text{нэ}} = \frac{E \cdot W \cdot (1 - \eta)}{100}.$$

Из графиков видно, что чем больше исходный коэффициент формы k_{Φ} , тем требуется большая емкость накопителя энергии для полного выравнивания графика. Есть некоторая величина емкости накопителя энергии, при которой можно полностью выровнять график нагрузки. Однако точка оптимума не соответствует полному выравниванию графика нагрузки, а это значит, что суммарные потери не будут минимальными при максимальном использовании накопителя энергии, то есть использовать накопитель энергии на полную мощность становится невыгодно. Более того, возможна ситуация, когда снижение потерь станет отрицательным, то есть потери при использовании накопителя энергии оказываются больше, чем без накопителя энергии.

Анализируя кривые рисунка 6, можно заметить, что применение СНЭ наиболее эффективно для потребителей с явно выраженной пиковой нагрузкой, то есть при максимальном k_{Φ} . Выравнивание графика нагрузки, то есть уменьшение k_{Φ} приводит к снижению потерь, при этом эффект увеличивается до определенной величины k_{Φ} , соответствующей минимуму суммарных потерь в рассматриваемой системе. При дальнейшем снижении k_{Φ} эффект уменьшается и может стать отрицательным.

Суммируя результаты анализа выше представленных графиков, можно сказать, что применение СНЭ более эффективно на объектах с явно выраженной пиковой нагрузкой, например в доильно-молочных блоках и кормоцехах животноводческих комплексов.

Эффект снижения потерь существенно зависит от КПД двойного преобразования электроэнергии в СНЭ, а из этого следует необходимость разработки СНЭ как можно с более высоким КПД.

Определение оптимального режима работы СНЭ, соответствующего минимуму суммарных потерь, требует серьезного анализа графика нагрузки потребителя. Для выполнения этого анализа в блок управления СНЭ потребуется интегрировать расчетный модуль, который будет вычислять параметры графиков нагрузки и выдавать управляющий сигнал на заряд/разряд накопителя энергии. Для данного модуля потребуется разработать алгоритм анализа параметров графика по статистическим данным прошлых дней и генерации программы управления режимом работы накопителя энергии.

Настроить СНЭ таким образом, чтобы она всегда работала в оптимальном режиме по потерям, можно будет достаточно легко для производственных объектов, имеющих однотипный график нагрузки, например доильно-молочных блоков и кормоцехов животноводческих комплексов. Для потребителей с переменными сезонными графиками нагрузки потребуется подстраиваться под реальный график нагрузки каждого отдельного режима потребления. Оптимум работы СНЭ по потерям для потребителей со сложной предсказуемой нагрузкой достичь будет практически невозможно.

Разработка расчетного модуля управляющего СНЭ, на основании анализа параметров графиков по статистическим данным энергопотребления прошлых дней, хорошо согласуется с современными потребностями развития электроэнергетической отрасли в рамках реализации концепции Smart Grid (интеллектуальные сети электроснабжения), подразумевающей внедрение технологий и оборудования, позволяющего автоматически повышать эффективность, надежность, экономичность, а также устойчивость производства и распределения электроэнергии.

Библиографический список

1. Веретенников Ю.Ю. Разработка регрессионной модели для оценки потерь электроэнергии распределительной электрической сети / Ю.Ю. Веретенников, В.В. Картацев // Инновационные технологии и технические средства для АПК : матер. международной науч.-практ. конф. молодых ученых и специалистов (г. Воронеж, 14–16 ноября 2018 г.). – Воронеж : ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2018. – С. 263–268.
2. Герасименко А.А. Передача и распределение электрической энергии / А.А. Герасименко, В.Т. Федин. – 2-е изд. – Ростов-на-Дону : Феникс, 2008. – 720 с.
3. ГОСТ Р 58092.1-2018. Системы накопления электрической энергии (СНЭЭ). Термины и определения. – Введ. 2019-03-01. – Москва : Стандартинформ, 2018. – 54 с.
4. Железко Ю.С. Выбор мероприятий по снижению потерь электроэнергии в электрических сетях : руководство для практических расчетов / Ю.С. Железко. – Москва : Энергоатомиздат, 1989. – 176 с.
5. Извеков Е.А. Оценка эффективности вторичного использования АКБ в качестве хранилища энергии / Е.А. Извеков // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2017. – № 4 (55). – С. 150–156.
6. Извеков Е.А. Перспективы вторичного использования отработавших АКБ для покрытия пиковых нагрузок энергосистемы / Е.А. Извеков, С.Ю. Жачкин // Наука, образование и инновации в современном мире : матер. национальной науч.-практ. конф. (г. Воронеж, 20–21 марта 2018 г.). – Воронеж : ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2018. – Ч. I. – С. 41–47.
7. Обоснование режимных параметров многофункционального стимулирующего доильного аппарата / Е.А. Андрианов, С.А. Бородин, А.А. Андрианов, Т.Н. Тертычная // Техника и оборудование для села. – 2018. – № 4. – С. 18–23.
8. Об установлении тарифов на электрическую энергию для населения и приравненных к нему категорий потребителей по Воронежской области на 2018 год : приказ управления по государственному регулированию тарифов Воронежской области от 18 декабря 2017 года № 55/1 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/446608925> (дата обращения: 18.01.2019).
9. Поспелов Г.Е. Потери мощности и энергии в электрических сетях / Г.Е. Поспелов, Н.М. Сыч ; под ред. Г.Е. Поспелова. – Москва : Энергоиздат, 1981. – 218 с.
10. Потери электроэнергии в электрических сетях энергосистем / В.Э. Воротницкий, Ю.С. Железко, В.Н. Казанцев и др. ; под ред. В.Н. Казанцева. – Москва : Энергоатомиздат, 1983. – 366 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ Принадлежность к организации

Евгений Александрович Извеков – кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и автоматики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Россия, г. Воронеж, e-mail: izvek@yandex.ru.

Юрий Михайлович Помогаев – кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и автоматики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Россия, г. Воронеж, e-mail: pomojuri@yandex.ru.

Дата поступления в редакцию 18.04.2019

Дата принятия к печати 22.05.2019

AUTHOR CREDENTIALS Affiliations

Evgeniy A. Izvekov, Candidate of Engineering Sciences, Docent, the Dept. of Electrical Engineering and Automation, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Russia, Voronezh, e-mail: izvek@yandex.ru.

Yuriy M. Pomogaev, Candidate of Engineering Sciences, Docent, the Dept. of Electrical Engineering and Automation, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Russia, Voronezh, e-mail: pomoyuri@yandex.ru.

Received April 18, 2019

Accepted May 22, 2019