

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ОТ ЗАГРУЗКИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

*Шаназаров Махаммадмурод Эргашалиевич магистрант группы ЭЭМ(к)-5-17 КГТУ им. И.Раззакова, Кыргызстан, 720044, г.Бишкек, пр. Ч.Айтматова 66, e-mail: [msanazarov017@gmail.com](mailto:msanazarov017@gmail.com)*

*Куржумбаева Роза Бейшенбековна, к.т.н., доцент, КГТУ им. И.Раззакова, Кыргызстан, 720044, г.Бишкек, пр. Ч.Айтматова 66, e-mail: [Kurzhumbaeva@mail.ru](mailto:Kurzhumbaeva@mail.ru)*

**Аннотация:** Одним из важных показателей надежности технического состояния является пропускная способность электрических сетей, т.е. соответствие номинальных параметров установленного электрооборудования ожидаемой нагрузке, используемой потребителями. Проблемы роста потерь и снижение качества электроэнергии связаны с тем, что наблюдается дефицит мощности в распределительных электрических сетях, в основном, в осенне-зимний период, когда электроэнергия используется на электроотопление в бытовом секторе и нагрузка возрастает в 3-4 раза по сравнению с летним периодом. В связи с дефицитом генерации по энергосистеме КР и недостатка финансирования для увеличения пропускной способности электрических сетей вопросы эффективного использования ЭЭ необходимо рассматривать с точки зрения управления электропотреблением.

**Ключевые слова:** пропускная способность электрических сетей, рост потерь электроэнергии, снижение качества электроэнергии, управление электропотреблением.

## RESEARCH OF DEPENDENCE OF LOSSES OF ELECTRIC POWER FROM LOADING OF ELECTRICAL EQUIPMENT

*Shanazarov Mahammadmurod Ergashalievich, undergraduate group EEM (k) -5-17 KSTU. I.Razzakov*

*Rosa Bezhshenbekovna Kurzhumbaeva, Ph.D., Associate Professor, KSTU. I.Razzakov, Kyrgyzstan, 720044, Bishkek, Ch.Aitmatov Ave. 66, e-mail: [Kurzhumbaeva@mail.ru](mailto:Kurzhumbaeva@mail.ru)*

**Abstract:** One of the important indicators of technical condition reliability is the carrying capacity of electrical networks, i.e. compliance of the nominal parameters of the installed electrical equipment with the expected load used by consumers. The problems of increasing losses and reducing the quality of electricity are due to the fact that there is a shortage of power in distribution electrical networks, mainly in the autumn-winter period, when electricity is used for electric heating in the residential sector and the load increases by 3-4 times compared with the summer period. Due to the lack of generation in the power system of the Kyrgyz Republic and the lack of funding to increase the capacity of electrical networks, the issues of efficient use of energy efficiency need to be considered from the point of view of power consumption management.

**Keywords:** capacity of electric networks, growth of electric power losses, decrease in quality of electric power, power consumption management.

Рациональное и умелое использование электроэнергии в настоящее время является наиболее эффективным направлением развития энергетического сектора, следствием которого является надежное обеспечения потребителей качественной электроэнергией.

Электроэнергия - товар особого вида, характеризующийся одновременностью его производства и потребления, требующий постоянного, непрерывного и качественного поддержания его параметров в заданных пределах [4]. Энергокомпании, осуществляющие услуги по поставке электрической энергии и обслуживанию электрических сетей, должны обеспечить потребителей электрической энергией, имеющей надлежащее качество, обеспечивая надежность и безопасность, а также принятые решения при проектировании и эксплуатации должны быть экономически обоснованы.

В представленной работе приведены результаты исследования зависимости потерь электроэнергии от загрузки электрооборудования, а также исследованы проблемы надежного обеспечения потребителей качественной электроэнергией. А также обосновывается возможность управления электропотреблением с целью увеличения пропускной способности электрических сетей.

Одним из важных показателей надежности технического состояния является пропускная способность электрических сетей Кыргызской энергосистемы, которая в свою очередь влияет на качество электроэнергии поставляемой потребителям, а также влияет на потери и статическую устойчивость энергосистемы.

Чтобы добиться соответствия всем требованиям стандартов по качеству электроэнергии, необходимо решить задачи, связанные с увеличением пропускной способности подстанций, воздушных и кабельных линий на всех этапах от генерации до потребителя (вырабатывающие, передающие, распределяющие компании) и иметь запас мощности от 30 до 50 % при пиковых нагрузках сети.

Дефицит мощности в распределительных электрических сетях наблюдается, в основном, в осенне-зимний период, когда электроэнергия используется на электроотопление в бытовом секторе. Согласно закона Джоуля-Ленца, повышение уровня загруженности электрооборудования приводит к увеличению потерь электроэнергии в электрических сетях, снижению качества электроэнергии и надежности. При загруженности электрооборудования и электрических сетей менее 50 % себестоимость электроэнергии и затраты на ее обслуживание, а потери превысят уровень потребления либо значительно увеличатся и превысят норматив потерь электроэнергии, что также негативно скажется на состоянии электроэнергетического сектора. Максимальная мощность установленного электрооборудования вырабатывающих электроэнергию станций должна превышать на 30-50 % потребляемую мощность. Максимальная мощность электрооборудования, т.е. пропускная способность воздушных и кабельных линий, трансформаторных подстанций передающих электрических сетей также должна превышать от 30 до 50 % мощности электроприемников потребителей. Максимальная мощность установленного оборудования, в распределяющих электрических сетях также должна превышать от 30 до 50 % мощности электроприемников потребителей. При таких условиях передачи, распределения и потребления электроэнергии можно добиться эффективного использования электроэнергии.

Потери активной мощности  $\Delta P_n$  в элементах сети с сопротивлением  $r$  зависят от напряжения  $U$

$$\Delta P_n = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} r \quad (1)$$

где  $P$  и  $Q$  - активная и реактивная мощность [4].

Потери холостого хода  $\Delta P_x$  в элементе можно определить

$$\Delta P_x \approx U_B^2 q \quad (2)$$

где  $U_B$  - напряжение на элементе (линии, компенсирующем устройстве и т.п.) или на стороне высшего напряжения трансформатора;  $q$  - проводимость элемента.

Как следует из (1)-(2) для снижения нагрузочных потерь необходимо повышать напряжение, а для снижения потерь холостого хода - снижать напряжение.

Оптимальные значения напряжений, соответствующие минимальным потерям, для ЭЭС зависят от структуры и режимов работы ее сетей всех классов напряжения. В сетях напряжением 110 кВ и выше нагрузочные потери могут быть сопоставимы с суммой потерь холостого хода и климатических потерь, а в сетях напряжением 6-35 кВ потери холостого хода и климатические доминируют над нагрузочными.

Дополнительные технические потери в сети при несинусоидальности напряжения менее 5 % незначительны, а при возрастании  $K_U$  до 7-15 % потери от высших гармоник могут достигать 10-12 % суммарных потерь мощности [4]. Наибольшие потери от высших гармоник в элементах СЭС возникают в резонансных режимах.

Несимметрия напряжения приводит к увеличению потерь мощности и электроэнергии во всех элементах электрической сети, что обусловлено протеканием токов обратной и нулевой последовательностей. Например, при  $K_{2i} = 2$  % добавочные потери в обмотках асинхронных двигателей  $\Delta P_{доб.}$  составляют 8 % основных потерь прямой последовательности  $\Delta P_{осн.}$ , а при  $K_{2i} = 5$  %  $\Delta P_{доб.}$  равны половине  $\Delta P_{осн.}$  [2, 3].

Таким образом, для оценки эффективности передачи и распределения электроэнергии при ухудшенном КЭ необходимо учитывать и ее дополнительные потери.

В связи с дефицитом генерации по энергосистеме КР вопросы эффективного использования ЭЭ необходимо рассматривать с точки зрения управления электропотреблением.

Идея управления нагрузкой энергосистемы на некотором временном интервале при заданном ограничении на величину пикового перетока состоит в следующем [1]. Используется, известный в теории автоматического управления принцип “слежения по траектории”, в соответствии с которым обеспечивается периодический контроль за отклонением реальной траектории объекта управления (энергосистемы) от желаемой и коррекция реальной траектории за счет введения управляющих воздействий на интервале  $[\tau_1 - \tau_2]$ . При этом фактическая траектория энергосистемы в пространстве состояний (пространстве балансов электрической энергии) задается уравнением:

$$\sum W_{пер}^{факт} = \sum W_{потр}^{факт} + \sum W_{пот}^{факт} - \sum W_{ош}^{факт}, \quad (3)$$

$$\sum W_{пер} = \sum W_{потр} + \sum W_{пот} + \sum W_{сн} - \sum W_{г}, \quad \sum W_{ош}^P = \sum W_{ген}^P - \sum W_{сн.}^P,$$

где:

- $\sum W_{пер}$  – покупная электроэнергия (транзитный переток);
- $\sum W_{потр}$  – электропотребление ЭЭС;
- $\sum W_{пот}$  – потери ээ в электрической сети;
- $\sum W_{сн}$  – расход энергии на собственные нужды электростанций;
- $\sum W_{г}$  – электроэнергия, вырабатываемая собственными источниками системы).

В условиях заданного ограничения на величину пикового перетока  $\sum W_{пер}^{предел}$  является желаемой траекторией системы.

Целевым условием управления электропотреблением системы (критерием эффективности управления) является условие:

$$\sum W_{нб} = \sum W_{пер}^{факт} - \sum W_{пер}^{предел} \Rightarrow 0, \quad (4)$$

В качестве интервала управления  $[\tau_1-\tau_2]$  целесообразно рассматривать месяц либо режимные сутки.

Таким образом, стратегия управления электропотреблением системы сводится к фиксации программной величины небаланса  $(\sum W_{НБ})$  и ее компенсации на интервале управления за счет введения ограничительных воздействий в узлах энергосистемы (распределенных во времени и по территории). Модель замещения энергорайона и энергосистемы, используемая в расчетах, представляют собой эквивалентный граф сети, свернутый относительно точек примыкания источников электроэнергии и узловых подстанций.

Методика определения распределенных управляющих воздействий в энергосистеме на суточном интервале содержит следующие разделы:

1. Определение предполагаемой величины небаланса электрической энергии в системе  $\Delta W_{НБ}^C$  по фактическому электропотреблению предыдущих суток.
2. Распределение  $\Delta W_{НБ}^C$  предыдущих суток по районам и подстанциям внутри каждого из энергорайонов:

$$\Delta W_{НБ}^P = \Delta W_{НБ}^C \frac{\sum W_{потр}^P}{\sum W_{потр}^C}; \quad \Delta W_{НБ}^{П/С} = \Delta W_{НБ}^P \frac{\sum W_{потр}^{П/С}}{\sum W_{потр}^P}, \quad (5)$$

3. Определение регулярной составляющей графиков нагрузки энергорайонов и подстанций внутри каждого из районов для характерных суток.
4. Определение нерегулярной составляющей графиков нагрузки энергорайонов и подстанций на основе анализа ретроспективных данных по электропотреблению.
5. Определение по каждой подстанции списка потребителей, ранжированного по величине нагрузки, разрешенной к отключению ( $\Delta P_{ОТК}$ ), и расчет максимально возможной мощности отключения  $(\sum P_{ОТК}^{max})$ .

6. Распределение управляющих воздействий суммарной величиной  $\Delta W_{НБ}^C$  ( $\Delta W_{НБ}^P$ ) в разрезе суточного графика нагрузки каждой подстанции.

7. Проверка балансов активной мощности и электрической энергии по районам и энергосистеме в целом путем расчетов режимов по моделям замещения.

Выполнение пунктов 5 и 6 требует решения задачи по компенсации небаланса электрической энергии, возникшего за предыдущий расчетный период времени. Для корректной математической постановки задачи необходима следующая информация:

1. Максимально возможные величины разрешенной к отключению мощности нагрузки ( $\Delta P_{ОТК}^{max}$ ) в каждом конкретном узле электрической сети.
2. Приоритеты по отключению потребителей (очередность в списке).
3. Временной интервал введения управляющих воздействий.
4. Величина небаланса электрической энергии за предшествующий период времени.

Результатом решения задачи является “график возможных отключений” потребителей по подстанциям энергорайона, обеспечивающий компенсацию небаланса электроэнергии на интервале текущих режимных суток (табл. 1).

Таблица 1.

График возможных отключений нагрузки для ликвидации небаланса энергии

Номер фидера	Название потребителя	Очереди отключения ( $\Delta P_{ОТК}^{max}$ , кВт)				
		1	2	3	...	n
Фб-1						
...						
Фб-m						

Математическая формулировка задачи управления электропотреблением на объектах систем электроснабжения в условиях дефицита активной мощности и электрической энергии заключается в следующем:

$$\left. \begin{aligned}
 & \sum_{i=1}^m \Delta P_{OTK_i} \Delta \tau_i - \Delta \mathcal{E}_{OTK}^{П/С} \rightarrow \max \\
 & \sum_{i=1}^m \Delta P_{OTK_i} \Delta \tau_i - \Delta \mathcal{E}_{OTK}^{П/С} \leq 0 \\
 & \mathcal{E}_{OTK}^{П/С} = \mathcal{E}_{НБ}^{П/С} \\
 & \Delta P_{OTK} = \frac{\mathcal{E}_{OTK}^{П/С}}{t} \\
 & \Delta \tau_i \geq t^{\min} \\
 & \Delta \tau_i \leq 24 \\
 & t^{\min} = \frac{\Delta \mathcal{E}_{НБ}^{П/С}}{P_{OTK}^{\max}}
 \end{aligned} \right\} \begin{aligned}
 & \sum_{i=1}^m P_{OTK_i}^j = P_{OTK}^j \\
 & P_{OTK}^{\max} = \sum_{j=1}^n P_{OTK}^j, \quad j = \overline{1, n}, \quad i = \overline{1, m} \\
 & \ell = k, \quad \text{для} \quad \min \left[ \text{INT} \left( \frac{\Delta P_{OTK}}{\sum_{j=1}^n P_{OTK}^j} \right) \right], \quad k = \overline{1, n} \\
 & \Delta P_{OTK_i} = \sum_{j=1}^{\ell} P_{OTK_i}^j + P_{OTK_i}^{\ell+1} \frac{\Delta P_{OTK} - \sum_{j=1}^{\ell} P_{OTK_i}^j}{\sum_{i=1}^m P_{OTK_i}^{\ell+1}}
 \end{aligned} \quad (6)$$

где:

$t$  – период времени компенсации небаланса;  $i$  – строка в списке (номер фидера, присоединения);  $j$  – очередь в списке отключений;  $\Delta P_{OTK_i}$  – мощность отключения  $i$ -го потребителя;  $\Delta \tau_i$  – время отключения  $i$ -го потребителя;  $\Delta W_{НБ}^{П/С}$  – некомпенсированный остаток небаланса энергии предыдущих суток;  $t^{\min}$  – минимально возможное время для компенсации небаланса электроэнергии;  $P_{OTK}^j$  – допустимая мощность отключения нагрузки потребителя на  $j$ -й очереди.

**Алгоритм распределения некомпенсированного остатка небаланса энергии  $\Delta W_{НБ}^{П/С}$**

1. Исключение части энергии из пиковой части графика нагрузки (ГН) подстанции в течение всего интервала прохождения пика нагрузки (применяется итерационная процедура расчетов).

\* Первая итерация: за основу принимается критерий сведения небаланса энергии на подстанции к минимуму и производится исключение энергии из ГН подстанции с учетом второго критерия. Результатом итерации является величина  $\Delta W_{НБ}^{ОСТ}$ .

\* *Учитывается:* а) многокритериальность подхода к решению задачи (минимизация  $\Delta W_{НБ}^{П/С}$ ; минимизация числа используемых очередей отключения нагрузки); б) предпочтительность использования интервалов прохождения пиков графика нагрузки энергосистемы в качестве интервалов введения управляющих воздействий.

\* Вторая итерация: за основу принимается критерий сведения числа используемых очередей отключения к минимуму применительно к найденному значению  $\Delta W_{НБ}^{ОСТ}$ .

Если  $\Delta W_{НБ}^{ОСТ}$  удовлетворяет этому критерию, то исключение энергии из пиковой части графика нагрузки подстанции завершается, в противном случае возвращаемся к первой итерации и увеличиваем исключаемую энергию, после чего опять переходим на вторую итерацию.

Результатом второй итерации является  $\Delta W_{НБ}^{ОСТ}$ , удовлетворяющая второму критерию. Распределение суммарной отключаемой мощности нагрузки подстанции между отдельными

потребителями. Распределение производится пропорционально потреблению электроэнергии между участниками одной очереди отключения

$$\Delta P_{\text{ОТК}} = K P_{\text{ОТК}}, \text{ где } K = \frac{W_{\text{потр}i}}{\sum_j W_{\text{потр}}^j}, \quad (7)$$

Полученные таким образом результаты переносятся на ГН каждого присоединения (потребителя). В итоге получаются новые ГН присоединений (потребителей) и график нагрузки подстанции.

2. Если ресурса подстанции по отключаемой мощности нагрузки хватает для покрытия  $\Delta W_{\text{НБ}}^{\text{ПЭС}}$ , то распределение завершается, в противном случае не исключенное значение  $\Delta W_{\text{из}}^{M,T}$  смещается на следующий интервал введения управляющих воздействий (следующие режимные сутки).

#### Выводы:

1. В работе приведены результаты исследования зависимости потерь электроэнергии от загрузки электрооборудования, а также исследованы проблемы надежного обеспечения потребителей качественной электроэнергией.
2. Обосновывается возможность управления электропотреблением с целью увеличения пропускной способности электрических сетей.
3. Для управления электропотреблением используется принцип “слежения по траектории”, в соответствии с которым обеспечивается периодический контроль за отклонением реальной траектории объекта управления (энергосистемы) от желаемой и коррекция реальной траектории за счет введения управляющих воздействий.

#### Список литературы:

1. Арзамасцев Д. А. Модели оптимизации развития энергосистем: Учеб. для электроэнергет. спец. вузов/ Д. А. Арзамасцев, А. В. Липес, А. Л. Мызин/ Под ред. Д. А. Арзамасцева. - М.: Высш. шк., 1987. - 272 с.: ил.
2. ГОСТ Р 54149-2010 «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения».
3. ГОСТ Р 51317.4.30 (МЭК 61000-4-30:2008) Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Методы измерений показателей качества электрической энергии.
4. Железко, Ю.С. Потери электроэнергии в электрических сетях энергосистем / Ю.С. Железко, В.Э. Воротницкий, В.Н. Казанцев; под ред. В.Н. Казанцева. - М.: Энергоатомиздат, 1983.
5. Электрические системы. Электрические сети: Учеб. для электроэнергетических спец. вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. / В.А. Веников, А.А. Глазунов, Л.А. Жуков и др.; Под ред. В.А. Веникова, В.А. Строева. М.: Высш. шк., 1998.