

## УЧЕТ ПРИРОДООХРАННЫХ ФАКТОРОВ ПРИ РАСПРЕДЕЛЕНИИ НАГРУЗКИ МЕЖДУ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯМИ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ, СОДЕРЖАЩЕЙ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Тремясов В.А., Кожемякин В.Е.

Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

### Аннотация

Учет природоохранных факторов при распределении нагрузки между электростанциями энергосистемы необходимо производить начиная с этапа освоения гидроэнергетических ресурсов региона. В существующих энергосистемах снижение выбросов возможно путем перераспределения генерирующих мощностей между ГЭС и ТЭС для снижения вредных выбросов ТЭС. Территориальное распределение ГЭС при каскадном использовании позволит снизить класс напряжения электропередачи, что позволит уменьшить площади просек, тем самым снизит вредное влияние на экологию региона. Так же необходимо учитывать, что в отдельных зонах энергосистемы недостаточно соблюдение требований по поддержанию ПДК, т.к. ущерб, наносимый природе и хозяйству может быть значительным. Для исследования возможностей снижения выбросов предлагается воспользоваться экономико-математической моделью, содержащей двухкритериальную целевую функцию. Такая модель может быть преобразована к виду задачи линейного программирования для исследования размеров возможного снижения выбросов при перераспределении мощности в ЭЭС. При распределении мощности между ТЭС региона следует отдавать предпочтение электростанциям, работающим на более экологичных видах топлива. В целом, за счет режимного фактора возможно добиться снижения величины вредных выбросов до величины 10–15%.

**Ключевые слова:** тепловые электростанции, снижение вредных выбросов, модель оптимизации, каскадное использование гидроэнергии, линейное программирование.

## CONSIDERATION OF ENVIRONMENTAL FACTORS IN LOAD SHARING BETWEEN POWER STATIONS OF A SYSTEM WITH HYDROELECTRIC PLANTS

Vyacheslav Kozhemyakin, Vladimir Tremyasov

Siberian Federal University, Krasnoyarsk

### Abstract

When distributing the load between power plants of the energy system, it is important to consider environmental factors from the stage of hydropower resource development in the region. In established power systems, one can reduce emissions by redistributing generation capacities between hydroelectric and thermal power plants, thus mitigating the harmful emissions from thermal power plants. The distribution of hydroelectric power plants across the region in a cascading manner will decrease the voltage class of power transmission. This, in turn, will reduce the area of clearings, ultimately minimizing the hazardous impact on the ecology of the area. It's essential to consider that certain parts of the energy system may require more than the compliance of maximum permissible concentrations as damage to both nature and economy can still arise. To investigate the potential for reducing emissions, an economic-mathematical model with a two-criteria target function is suggested. This model can be converted into a linear programming problem, which can enable the assessment of the extent to which emissions can be reduced through reallocating power system capacity. In allocating capacity between thermal power plants in the area, preference must



*be given to plants that use more eco-friendly fuels. In general, adhering to a specific regime can result in a 10-15% decrease in harmful emissions.*

**Keywords:** *thermal power plants, reduction of harmful emissions, optimization model, cascade use of hydropower, linear programming.*

## Введение

Получение конечных результатов для удовлетворения потребностей в электроэнергии в большинстве случаев связано с производством отходов, которые отрицательно влияют на атмосферу, гидросферу и сушу [1]. Это предопределяет необходимость глубокого экономического анализа в системе производство электроэнергии – природа. В связи с этим практическое значение приобретают балансовые модели на уровне отраслей народного хозяйства с учетом воздействия на природу.

Экономические модели производственных систем, в которых можно учитывать воздействие на окружающую среду, могут быть построены различными способами [2, 3].

## Учет экологического фактора при определении схемы освоения гидроэнергетического потенциала региона энергосистемы

Совокупное влияние электростанций ЭЭС на окружающую природную среду региона главным образом зависит от удельного веса в структуре ЭЭС различных типов электростанций и их пространственного размещения. При этом немаловажное значение имеет также учет распределения нагрузки между электростанциями системы. Важность учета данного фактора обусловлена нелинейным возрастанием влияния на окружающую среду электростанций энергосистемы при увеличении их рабочей мощности и изменением природоохранных требований по сезонам. В большой мере сказанное выше относится к ТЭС и ГЭС.

Гидроэлектростанции, трансформируя гидрологический режим водотока, могут тем самым оказывать существенное воздействие на условия воспроизводства, миграции и зимовки рыб, изменять агробиологические условия поймы. Кроме этого, могут возникнуть осложнения хозяйствования в нижнем бьефе. Одним из средств регулирования такого воздействия являются ограничения, накладываемые на суточные и сезонные режимы работы ГЭС. Их разрабатывают для каждой ГЭС энергосистемы на основе детального анализа конкретных природных и хозяйственных условий в зоне непосредственного влияния ГЭС.

Наиболее жестким с точки зрения ограничения минимального расхода можно считать расход санитарного попуска [4]. Он определяется исходя из нужд водопотребителей и водопользователей, расположенных в нижнем бьефе ГЭС. При планировании работы ГЭС в энергосистеме стоит учитывать невозможность снижения расходов через гидроузел до значений меньше санитарного попуска.

Очевидно, что с точки зрения более эффективного использования водных ресурсов, а также снижения выбросов вредных веществ в атмосферу, холостые сбросы необходимо производить через гидроагрегаты, а не через водосбросы, т.е. в холостую. При этом, в зависимости от вида регулирования стока водохранилищем, не всегда удается трансформировать сток реки полностью, чтобы избежать холостых сбросов.

С точки зрения снижения количества вредных выбросов в атмосферу, задача более полного использования гидроэнергетического потенциала реки позволяет получить положительный эффект в границах целых регионов. В случае каскадного использования потенциала реки удастся получить дополнительную регулируемую ёмкость водохранилищ при условии затопления меньших по площади территорий, что связано



со снижением высоты плотин в каскаде и, как следствие, снижением площадей затопления водохранилищ.

Вместе с уменьшением площадей отчуждаемых из хозяйственного использования территорий, каскадное использование гидроресурсов позволяет географически распределить экологичные генерирующие мощности ГЭС, что позволяет снижать выбросы не локально, а на значительной территории энергосистемы. При этом отпадает необходимость осуществления дальнейшей электропередачи на сверхвысоких напряжениях.

Возведение линий сверхвысоких напряжений (330-750 кВ) сопряжено с производством работ по организации просек, связанных с вырубкой и выкорчевыванием лесов. При снижении напряжения электропередачи уменьшается и ширина просеки, необходимой для строительства воздушных линий, т.е. уменьшаются площади вырубки лесов.

### Модель снижения массы вредных выбросов тепловых электростанций при распределении нагрузки в электроэнергетической системе

Тепловые электростанции при сжигании органического топлива выбрасывают в атмосферу продукты сгорания, содержащие такие вредные вещества, как оксиды серы ( $SO_2$ ), азота ( $NO_2$ ), ванадия ( $V_2O_5$ ) и др. Законодательством предусмотрены предельные допустимые концентрации (ПДК) этих веществ в приземном слое. Однако даже при соблюдении таких требований в отдельных зонах прямой и косвенный ущерб природе и хозяйству может быть значительным. Поэтому наряду с поддержанием ПДК возникает задача снижения суммарного по ЭЭС выброса некоторых вредных веществ, среди которых особо выделим  $SO_2$ . Требование дополнительного снижения выброса вредных веществ – одна из целей в задаче управления режимом ЭЭС, что позволяет включить его в целевую функцию оптимизационной модели.

При определении оптимальной структуры генерирующих мощностей ЭЭС на перспективу нужно иметь в виду, что все же основными мероприятиями, позволяющими снизить вредные выбросы в системе, являются очистка дымовых газов и предварительная десульфация топлива. Но данные мероприятия характеризуются пока еще высокой стоимостью и недостаточной эффективностью. Поэтому роль режимного фактора в ЭЭС, содержащих ГЭС, может быть существенной. Для исследования возможностей снижения массы нежелательных выбросов по ЭЭС за счет специального распределения нагрузки сформулируем расчетную экономико-математическую модель, содержащую двухкритериальную целевую функцию [5]:

$$E^* = \sum_{i=1}^2 v_i e_i = v_1 \frac{\bar{Z} - \bar{Z}^H}{\bar{Z}^B - \bar{Z}^H} + v_2 \frac{\bar{M} - \bar{M}^H}{\bar{M}^B - \bar{M}^H} \rightarrow \min \bar{Z} = \sum_t \sum_j \bar{Z}_j N_{j,t};$$

$$M = \sum_t \sum_j m_j N_{j,t} \quad (j = 1, 2, \dots, J);$$

$$\sum_j N_{j,t} \geq N_t \quad (t = 1, 2, \dots, T);$$

$$f_t = f_{\text{ном}}; U_t = U_{\text{ном}}; N_{j,t} >< N_{j,t}^{\Pi},$$
(1)

где  $v_1, v_2$  – оценки относительной значимости соответственно цели минимизации приведенных затрат ( $Z$ ) и цели минимизации суммарного по ЭЭС выброса вредных веществ ( $M$ );  $\bar{Z}^B, \bar{Z}^H$  – верхняя и нижняя границы возможных размеров приведенных затрат по ЭЭС;  $\bar{M}^B, \bar{M}^H$  – то же для суммарного по ЭЭС выброса вредных веществ;  $\bar{Z}_j, m_j$  – удельные



приведенные затраты и выбросы вредных веществ для каждого  $j$ -го типа электростанции;  $N_{j,t}$  – рабочая мощность  $j$ -й станции в  $t$ -й момент времени;  $N_t$  – нагрузка ЭЭС в момент времени  $t$ ;  $f_{\text{НОМ}}$ ,  $U_{\text{НОМ}}$  – номинальная частота и напряжение ЭЭС;  $N_{j,t}^{\text{П}}$  – природоохранное ограничение мощности  $j$ -й электростанции ЭЭС в момент времени  $t$ .

При отсутствии экспертно-выявленных оценок  $\nu_1$  и  $\nu_2$  [6] данную модель удобно трансформировать в одноцелевую, переводя требование снижения суммарных вредных выбросов ТЭС и уменьшения отрицательного воздействия ГЭС системы в ограничение:

$$\begin{aligned} \bar{Z} &= \sum_t \sum_j \bar{Z}_j N_{j,t} \rightarrow \min; \\ \sum_j N_{j,t} &\geq N_t \quad (j = 1, 2, \dots, T); \\ f_t &= f_{\text{НОМ}}; \quad U_t = U_{\text{НОМ}}; \quad N_{j,t} >< N_{j,t}^{\text{П}}; \\ \sum_t \sum_j m_j N_{j,t} &< M^{\text{П}}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $M^{\text{П}}$  – природоохранное ограничение суммарной по системе массы вредных выбросов и других отрицательных воздействий на природу.

Такая модель режимного фактора, преобразованная к виду задачи линейного программирования, была принята в качестве инструмента исследования при оценке размеров возможного снижения выбросов вредных веществ ( $SO_2$  и  $NO_2$ ) ТЭС за счет рационального перераспределения между станциями энергосистемы [7]. Объектом совместных исследований была выбрана объединенная энергосистема Северо-Запада России на одном из перспективных уровней своего развития.

В числе электростанций системы рассмотрены ТЭС, ГЭС и ГАЭС. Снижение суммарной величины вредных выбросов по системе обеспечивалось увеличением загрузки более «чистых» электростанций, т. е. ГЭС и ГАЭС, при соответствующей разгрузке остальных электростанций. Экономичность работы системы при этом, естественно, несколько снижалась.

## Выводы

Исследования показали, что снижение выбросов достигается в основном за счет уменьшения загрузки ТЭС, работающих на сланце, при увеличении загрузки газомазутных и частично угольных КЭС. Возможности снижения выбросов путем изменения режима в летний период оказываются несколько больше, чем зимой, что объясняется увеличением доли маневренных гидроэлектростанций. В целом за счет режимного фактора снижение суммарной массы вредных выбросов  $SO_2$  и  $NO_2$  в атмосферу по ОЭС Северо-Запада достигалось в размере 5–7 %. Для других ОЭС данная цифра может быть 10–15 %, т. е. уровня практической значимости.

## Библиографический список

1. Гук Ю.Б. Комплексный анализ эффективности технических решений в энергетике. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 176 с.
2. Клима И. Оптимизация энергетических систем. М.: Высшая школа, 1991. 302 с.
3. Воропай Н.И. Теория систем для электроэнергетиков. – Новосибирск: Наука, 2000. 270 с.



4. Февралев А.В. Проектирование гидроэлектростанций на малых реках. – Нижний Новгород: Изд-во ННГАСУ, 2014. – 181 с.
5. Тремясов В.А. Теория принятия решений в электроэнергетике. – Красноярск: Изд-во СФУ, 2020. – 126 с.
6. Бешелев С.Д. Математико-статистические методы экспертных оценок. – М.: Статистика, 1974. – 160 с.
7. Окоороков В.Р. Управление электроэнергетическими системами. Техничко-экономические принципы и методы. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1976. 224 с.

### References

1. Guk, Y.B., Dolgov, P.P., & Okorokov, V.R. (1985). *Kompleksnyj analiz effektivnosti tekhnicheskikh reshenij v energetike* [Comprehensive analysis of technical solutions' efficiency in the energy sector]. Energoatomizdat. [In Russian]
2. Klima, E. (1991). *Optimizaciya energeticheskikh sistem* [Optimization of energy systems]. Vysshaya shkola. [In Russian]
3. Voropai, N.I. (2000). *Teoriya sistem dlya elektroenergetikov* [Systems theory for electric power engineers]. Nauka. [In Russian]
4. Febrelev, A.V. (2014). *Proektirovanie gidroelektrostantsij na malyh rekah* [Design of hydroelectric power stations on small rivers] (2nd ed.). NNGASU. [In Russian]
5. Tremyasov, V.A., & Krivenko, T.V. (2020). *Teoriya prinyatiya reshenij v elektroenergetike* [Theory of decision-making in electric power engineering]. SFU. [In Russian]
6. Beshelev, S.D., & Gurvich, F.G. (1974). *Matematiko-statisticheskie metody ekspertnyh ocenok* [Mathematical and statistical methods of expert evaluations]. Statistica. [In Russian]
7. Okorokov, V.R. (1976). *Upravlenie elektroenergeticheskimi sistemami. Tekhniko-ekonomicheskie principy i metody* [Management of electric power systems. Technical and economic principles and methods]. LSU. [In Russian]

### Сведения об авторах

**Тремясов Владимир Анатольевич**, канд. техн. наук, доцент, кафедра электроэнергетики, Политехнический институт СФУ, email: [emf\\_tva@mail.ru](mailto:emf_tva@mail.ru).

**Кожемякин Вячеслав Евгеньевич**, аспирант, кафедра электроэнергетики, Политехнический институт СФУ, e-mail: [slava-kozhemyakin@mail.ru](mailto:slava-kozhemyakin@mail.ru), ORCID: [0000-0002-2941-9206](https://orcid.org/0000-0002-2941-9206).

### Authors about

**Vladimir Anatolyevich Tremyasov**, Cand. of Tech. Sciences, associate professor, Department of Electrical Power Engineering, Polytechnic Institute of SFU, email: [emf\\_tva@mail.ru](mailto:emf_tva@mail.ru).

**Vyacheslav Evgenyevich Kozhemyakin**, post-graduate student, Department of Electrical Power Engineering, Polytechnic Institute of SFU, e-mail: [slava-kozhemyakin@mail.ru](mailto:slava-kozhemyakin@mail.ru), ORCID: [0000-0002-2941-9206](https://orcid.org/0000-0002-2941-9206).

