

6  
А-24  
МИНИСТЕРСТВО ~~СРЕДНЕГО~~ И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ АРМЯНСКОЙ ССР

---

Ереванский политехнический институт  
им. К. Маркса

На правах рукописи

О. П. ШЕРБАКОВА

ИССЛЕДОВАНИЯ НЕКОТОРЫХ ВОПРОСОВ ПОКРЫТИЯ ПИКОВЫХ  
ЗОН ГРАФИКОВ НАГРУЗКИ СЛОЖНЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМ

АВТОРЕФЕРАТ

исследования

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель  
доктор технических наук  
профессор Е. Д. САФАРОВ

Ереван - 1966 г.

Современный этап развития энергетических систем характеризуется с одной стороны, преобладающими технически эффективными тепловыми электростанциями, а с другой — солнечными агрегатами, использование которых по совокупности технико-экономических причин ограничено в сильно переменном режиме, а с другой — непрерывным процессом разуплотнения режима электропотребления и повышения пиковости графиков электрической нагрузки.

В связи с этим становится особо актуальным вопрос покрытия интенсивно растущих пиков графиков нагрузки, являющийся частью общей проблемы оптимизации направления развития энергетических систем и выбора рациональной структуры их генерирующих мощностей на перспективу.

Значительный вклад в решение этих важных и актуальных задач внесли как советские, так и зарубежные исследователи, анализу работ которых посвящена первая глава реферата.

Ранние исследования по указанным вопросам, как правило, основывались на методе сопоставления вариантов развития энергетической системы и выбора наилучшего, без полной уверенности в том, что среди рассматриваемых вариантов находится оптимальный.

Новым направлением в исследовании рассматриваемых вопросов явилось математическое моделирование с применением новейших математических методов оптимизации и использованием электронно-вычислительной техники. Такой подход дает возможность, с одной стороны, устранить недостатки, присущие вариантному методу сопоставления, и обоснованно выбирать действительно оптимальный вариант, с другой — получать качественно новые решения этих сложных задач.

В отечественной практике эксплуатации и проектирования энергетических систем проблема пикового режима является сравнительно новой, однако в настоящее время уже выявлены и научно обоснованы принципиальные закономерности и положения при ее исследовании. В работе, основываясь на эти положения, сделана попытка решить задачу определения оптимального плана развития энергетической системы используя классические оптимизирующие методы математического аппарата. С этой целью вся информация по нагрузке и ее режиму задается не в дискретной, а в аналитической форме. Это дает возможность все технико-экономические энергетические показатели генерирующих мощностей выразить в зависимости от определяемых параметров. В связи с этим в работе проведен анализ режима электропотребления для трех энергосистем Закавказья с целью выявления тенденции изменения его на перспективу, а также выбора наиболее гибкого по форме аналитического выражения кривой продолжительности графика нагрузки, основываясь на который составлена математическая модель структуры генерирующих мощностей энергетической системы.

Наряду с вопросами определения оптимального соотношения между вводимыми мощностями пиковых и базисных электростанций значительную актуальность приобретают вопросы исследования целесообразности участия межсистемных перетоков для покрытия пиков графиков нагрузки энергетических систем. Поэтому в реферированной работе решен также вопрос определения эффективности передачи пиковой мощности по ЛЭП.

I. Режим электропотребления и анализ кривой продолжительности графика нагрузки

Во второй главе диссертационной работы выявлены характерные особенности режима электропотребления трех энергетических систем Закавказья, в основном обуславливаемые совершенно различным характером топливно-энергетических ресурсов отдельных республик, а также их своеобразным территориальным расположением, которые предопределили специфические черты развития их энергетики.

Анализ суточных графиков нагрузки системы как за характерные периоды года (зима, лето), так и переходных дней (воскресенье, понедельник) за последние 9 лет показал, что существуют определенные закономерности в их конфигурации и выявляется тенденция к их разуплотнению. Для выявления влияния структуры потребителей на конфигурацию графиков нагрузки, на примере энергосистемы Армянской ССР был проведен также анализ по основным группам потребителей: промышленность и ее отрасли, коммунально-бытовой сектор, сельское хозяйство, электрифицированный железнодорожный и городской транспорт, строительство и др.

Анализ был проведен по 146 промышленным объектам, подразделяемым как по признаку сменности, так и по отраслям промышленности. На ЭЦМ-цифровой машине Раздан-2, по сравнительно простому алгоритму, были проанализированы все 8760 часовые нагрузки, в результате чего были построены кривые продолжительности различных нагрузок системы.

В результате эти тановлено, что за послед-  
ние годы все более п (ста) разуплотнения суточных  
графиков нагрузки. Данное разуплотнение происходит как за  
счет изменения структуры электропотребления основных категорий  
потребителей, а также за счет ослабления регулирования графиков  
нагрузки отдельных групп потребителей в связи со снятием огра-  
ничений энергодобалансу.

В работе предложено новое аналитическое выражение кривой  
продолжительности графика нагрузки в виде:

$$P = P_{max} e^{-\alpha t} \quad \text{или} \quad S = e^{-\alpha t}, \quad (I-1)$$

где  $S = \frac{P}{P_{max}}$ ,  $\alpha$  - фактор нагрузки, характеризующий конфи-  
гурацию кривой продолжительности. Это выражение отличается от  
существующих методов аппроксимации кривой простотой, меньшим ко-  
личеством эмпирических коэффициентов и т.д., но включает основ-  
ные параметры, характеризующие график нагрузки и удовлетворя-  
ющие граничным условиям вида:

$$\text{при } t=0, P=P_{max}; \quad t=1, P=P_{min}, \quad (I-2)$$

- где
- $P$  - нагрузка системы в каждый момент времени;
  - $P_{min}, P_{max}$  - соответственно минимальное и максимальное значения нагрузок;
  - $t$  - относительная величина продолжительности нагрузки.

Значение величины  $\alpha$  в (I-1) определяется из

$$\int_0^1 e^{-\alpha t} dt = \frac{1 - e^{-\alpha}}{\alpha} = \frac{P_{cp}}{P_{max}}, \quad (I-3)$$

что представляет собой отклонение от суточной или годо-  
вой выработки электроэнергии на площади, ограничен-  
ной кривой продолжительности нагрузки (рис. Iа), т.е.

$$\frac{1 - e^{-\alpha}}{\alpha} = \frac{\int_0^1 P dt}{P_{max} T} = \frac{P_{cp}}{P_{max}}, \quad (I-4)$$

где  $P_{cp}$  - средняя ордината графика нагрузки,  
 $T = 8760$  часов.

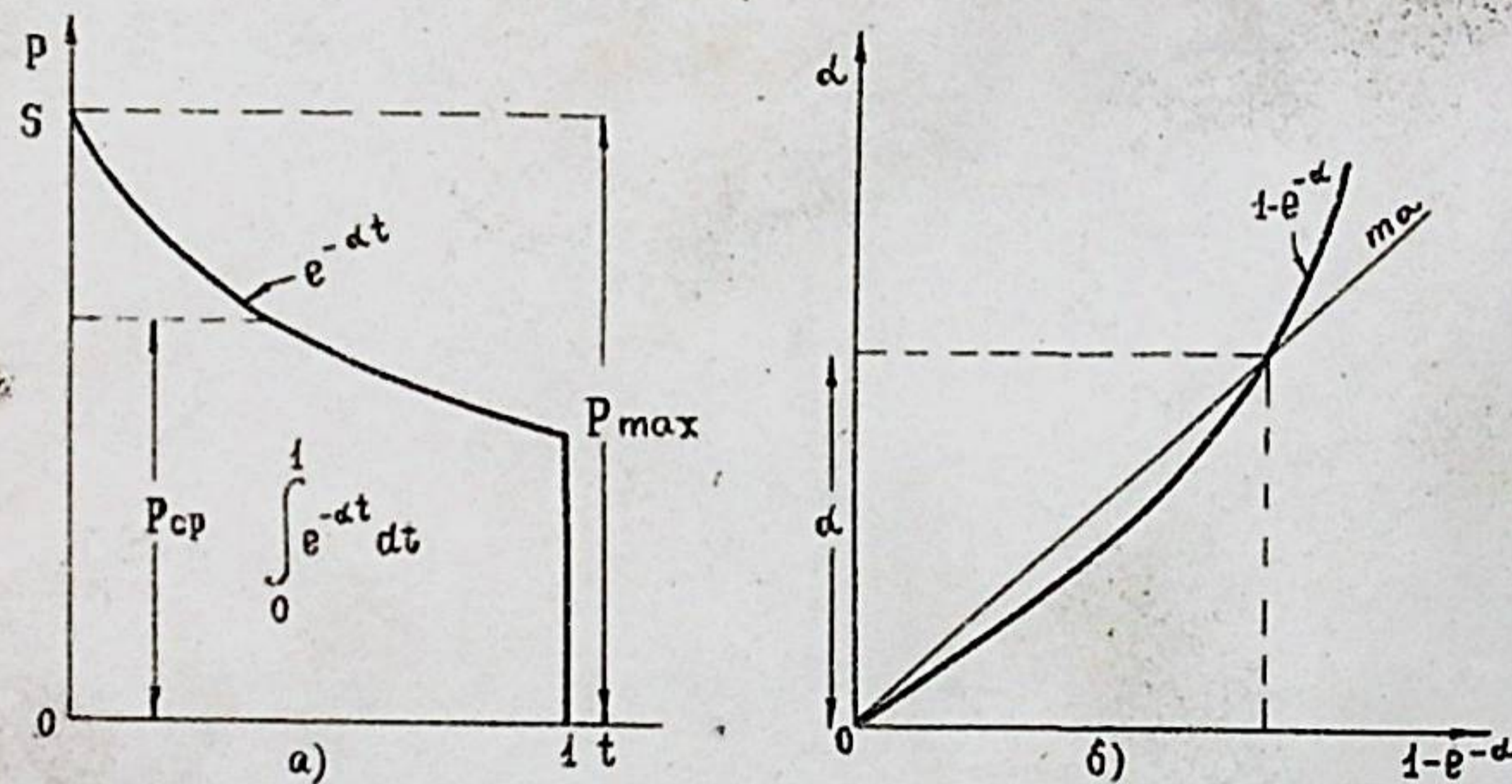


Рис. I

В диссертации проведено сравнение предлагаемой формулы кри-  
вой продолжительности (I-1) с существующими и показано более  
близкое совпадение этой кривой с кривыми фактических графиков  
нагрузок.

Для условий Закавказских энергосистем получены значения  
деляемым для различных значений  $m = \frac{P_{cp}}{P_{max}}$ , на основании  
ности. На значений  $S$ , что дает возможность легко  
простой соответствующую кривую продолжительности.  
грузки, необходимости более точной аппроксимации кривой продол-  
сти в работе также предложена следующая формула:

$$P = P_{\max} \left( e^{-\alpha t} + \left( e^{-\alpha} - \frac{P_{\min}}{P_{\max}} \right) \sin \frac{\omega}{2} t \right), \quad (I-5)$$

же в относительных величинах:

$$S = e^{-\alpha t} \sin \frac{\omega}{2} t, \quad \text{где } \alpha = e^{-\alpha} - \frac{P_{\min}}{P_{\max}}. \quad (I-6)$$

Интервал (I-6) аналогичен (I-3) в пределах от 0 до 1, получим условие для получения величины  $\alpha$ .

## 2. Оптимальное планирование развития энергетических систем на перспективу

Основной задачей оптимального планирования развития энергетических систем на перспективу при заданных показателях роста нагрузки и ее режимах, а также составе существующих и возможных к вводу электростанций с их технико-экономическими показателями, является выбор такого состава генерирующих мощностей, при котором обеспечивается минимум расчетных затрат по системе в целом.

С математической точки зрения подобная задача является принципиально нелинейной, динамической и многомерной задачей на отыскание экстремума (минимума).

В работе, в качестве математического аппарата для решения поставленной задачи, использован оптимизирующий метод классического математического анализа. С этой целью строится математическая модель структуры генерирующих мощностей системы, для чего все данные по нагрузке и ее режиму задаются в аналитической форме.

Поставленная задача решается для двух случаев: В первом — существующие до расчетного периода электростанции при вводе новых располагаются в базисе графика нагрузки системы. Во втором — более типичным современным энергосистемам, рост нагрузки в расчетный период покрывается как за счет мощных современных базисных, так и ввода специализированных пиковых электростанций. При этом часть существующих тепловых электростанций, как менее эффективных по сравнению с вновь вводимыми базисными электростанциями, займет промежуточное положение в графике нагрузки системы, меняя свой режим работы.

Критерием оптимальности при решении поставленных задач принят принцип минимума расчетных затрат по системе в целом, т.е. минимум следующей функции:

$$\Phi(K, И) = \min, \quad (2-1)$$

где  $K, И$  — соответственно первоначальные капиталовложения и годовые эксплуатационные затраты, являющиеся в свою очередь функцией генерирующих мощностей электростанций, типа, единичной мощности агрегатов и др.

Минимум функции (2-1) должен выполняться совместно с условием баланса мощностей системы:

$$\Psi_t = \sum_{i=1}^n N_i - P_c - \Delta N_n - \Delta N_{сн} - \Delta N_{рес} = 0, \quad (2-2)$$

где  $N_i$  — мощность  $i$ -ой электростанции;  
 $P_c$  — суммарная нагрузка энергосистемы;  
 $\Delta N_n, \Delta N_{сн}, \Delta N_{рес}$  — соответственно потери в линиях электропередачи, расходы на собственные нужды

электростанций, а также резервная мощность системы, которые в первом приближении могут считаться включенными в суммарную нагрузку системы. При этом условие баланса мощностей (2-2) в относительных величинах может быть записано в виде:

$$\sum_{i=1}^n S_i = L \quad (2-3)$$

Используя аналитическое выражение кривой продолжительности (I-I), а также условие баланса (2-3), в работе получено следующее выражение топливной составляющей годовых издержек электростанций:

$$U_{Ti} = P_{\max} T \left\{ -\frac{a_i}{\alpha} \left[ \sum_{j=1}^i S_j (\ln \sum_{j=1}^i S_j - 1) - \sum_{j=1}^{i-1} S_j (\ln \sum_{j=1}^{i-1} S_j - 1) \right] + b_i S_i \right\}, \quad (2-4)$$

где  $a_i$  и  $b_i$  - параметры, определяющие издержки по топливу для производства одного квтч электроэнергии и зависящие от числа часов использования установленной мощности, типа и единичной мощности агрегата, вида топлива, дальности его транспорта.

В реферируемой работе подсчитаны значения параметров  $a$  и  $b$  для условий Армянской энергосистемы для различного вида топлива (уголь, мазут, газ) и различного месторождения (Донбасс, Краснодар, Карадаг), с учетом переменного режима потребления мазута и газа.

Суммируя  $U_{Ti}$  для всех значений  $i = 1, 2, \dots, n$ , получим общие издержки по топливу для системы тепловых электростанций:

$$U_{T\sum} = P_{\max} T \sum_{i=1}^n \left\{ -\frac{a_i}{\alpha} \left[ \sum_{j=1}^i S_j (\ln \sum_{j=1}^i S_j - 1) - \sum_{j=1}^{i-1} S_j (\ln \sum_{j=1}^{i-1} S_j - 1) \right] + b_i S_i \right\}. \quad (2-5)$$

Выражая капиталовложения системы в функции от установленной мощности электростанций, расчетные издержки по энергосистеме, с учетом топливной составляющей (2-5), запишутся в виде.

$$\Phi(S_i) = P_{\max} T \sum_{i=1}^n \left\{ -\frac{a_i}{\alpha} \left[ \sum_{j=1}^i S_j (\ln \sum_{j=1}^i S_j - 1) - \sum_{j=1}^{i-1} S_j (\ln \sum_{j=1}^{i-1} S_j - 1) \right] + b_i S_i \right\} + P_{\max} \sum_{i=1}^n L_i \quad (2-6)$$

где  $L$  - эксплуатационные расходы.

$$L = K'(1.56 P_a + P_n) + 1.3 m \Pi,$$

$U_0$  - постоянная составляющая затрат по системе.

Рассматриваемая задача в поставленной форме является обобщенной задачей, исследуемой на условный экстремум (минимум) с соблюдением условия (2-2) или (2-3).

Применяя метод неопределенных множителей Лагранжа, можно, вместо исследования на условный экстремум функции (2-6), исследовать на безусловный экстремум следующую функцию:

$$\Phi(S_i, \lambda) = P_{\max} T \sum_{i=1}^n \left\{ -\frac{a_i}{\alpha} \left[ \sum_{j=1}^i S_j (\ln \sum_{j=1}^i S_j - 1) - \sum_{j=1}^{i-1} S_j (\ln \sum_{j=1}^{i-1} S_j - 1) \right] + b_i S_i \right\} + P_{\max} \sum_{i=1}^n L_i S_i + U_0 + \lambda \left( \sum_{i=1}^n S_i + S_0 - 1 \right) = \min, \quad (2-7)$$

где  $\lambda$  - множитель Лагранжа.

Приравняв к нулю частные производные  $\Phi(S_i, \lambda)$  по переменным  $S_i$  и производя несложные преобразования, получим систему уравнений:

$$P_{max} T \left\{ -\frac{a_1}{d} \ln(S_0 + S_1) + b_1 - \frac{a_2}{d} \left[ \ln(S_0 + S_1) - \ln(S_0 + S_1) \right] - \dots - \frac{a_i}{d} \left[ \ln(S_0 + \dots + S_i) - \ln(S_0 + \dots + S_{i-1}) \right] - \dots - \frac{a_{i+1}}{d} \left[ \ln(S_0 + \dots + S_{i+1}) - \ln(S_0 + \dots + S_i) \right] - \dots - \frac{a_n}{d} \left[ \ln(S_0 + \dots + S_n) - \ln(S_0 + \dots + S_{n-1}) \right] \right\} + P_{max} L_i + \lambda = 0,$$

$$P_{max} T \left\{ -\frac{a_i}{d} \left[ \ln(S_0 + \dots + S_i) - \ln(S_0 + \dots + S_{i-1}) \right] - \dots - \frac{a_{i+1}}{d} \left[ \ln(S_0 + \dots + S_{i+1}) - \ln(S_0 + \dots + S_i) \right] - \dots - \frac{a_n}{d} \left[ \ln(S_0 + \dots + S_n) - \ln(S_0 + \dots + S_{n-1}) \right] \right\} + P_{max} L_i + \lambda = 0, \quad (2-8)$$

$$\frac{a_n}{d} \left[ \ln(S_0 + \dots + S_n) - \ln(S_0 + \dots + S_{n-1}) \right] + P_{max} L_n + \lambda = 0,$$

$$P_{max} T \left\{ -\frac{a_n}{d} \ln(S_0 + \dots + S_n) + b_n \right\} + P_{max} L_n + \lambda = 0.$$

Совместное решение системы уравнений (2-8), (2-6) и (2-2) дает оптимальные значения  $S_i$ , которое производится следующим образом. Как видно из рис.2, сумма  $(S_0 + \dots + S_i)$  равна ординате точки  $i$  на кривой  $e^{-at}$ , а логарифм этой суммы будет равен соответственно произведению  $at_i$ . Учитывая последнее, неизвестные  $S_i$  в системе уравнений (2-8) заменяются переменными  $t_i$ , решая вновь полученную систему уравнений относительно  $t_i$ , получим:

$$t_i = \frac{(L_i - L_{i-1}) + T(b_i - b_{i-1})}{T(a_{i-1} - a_i)} \quad (2-9)$$

Откладывая полученные значения  $t_i$  на оси абсцисс (рис.2) и поднимаясь вверх до пересечения с кривой  $e^{-at}$ , определяем оптимальную мощность  $i$ -ой электростанции.

Таким образом получаем, что значения величин  $t_i$  всецело определяются экономическими ( $L_i$ ) и энергоэкономическими ( $a_i$  и  $b_i$ ) показателями соответствующих электростанций и не зависят от кривой продолжительности графика нагрузки. Однако, при

найденном определенном значении мощности электростанции, определяемая соответствующим значением, в основном определяется по кривой продолжительности графика нагрузки и по величине суммарной мощности существующих, до расчетного периода, электростанций (рис.2).

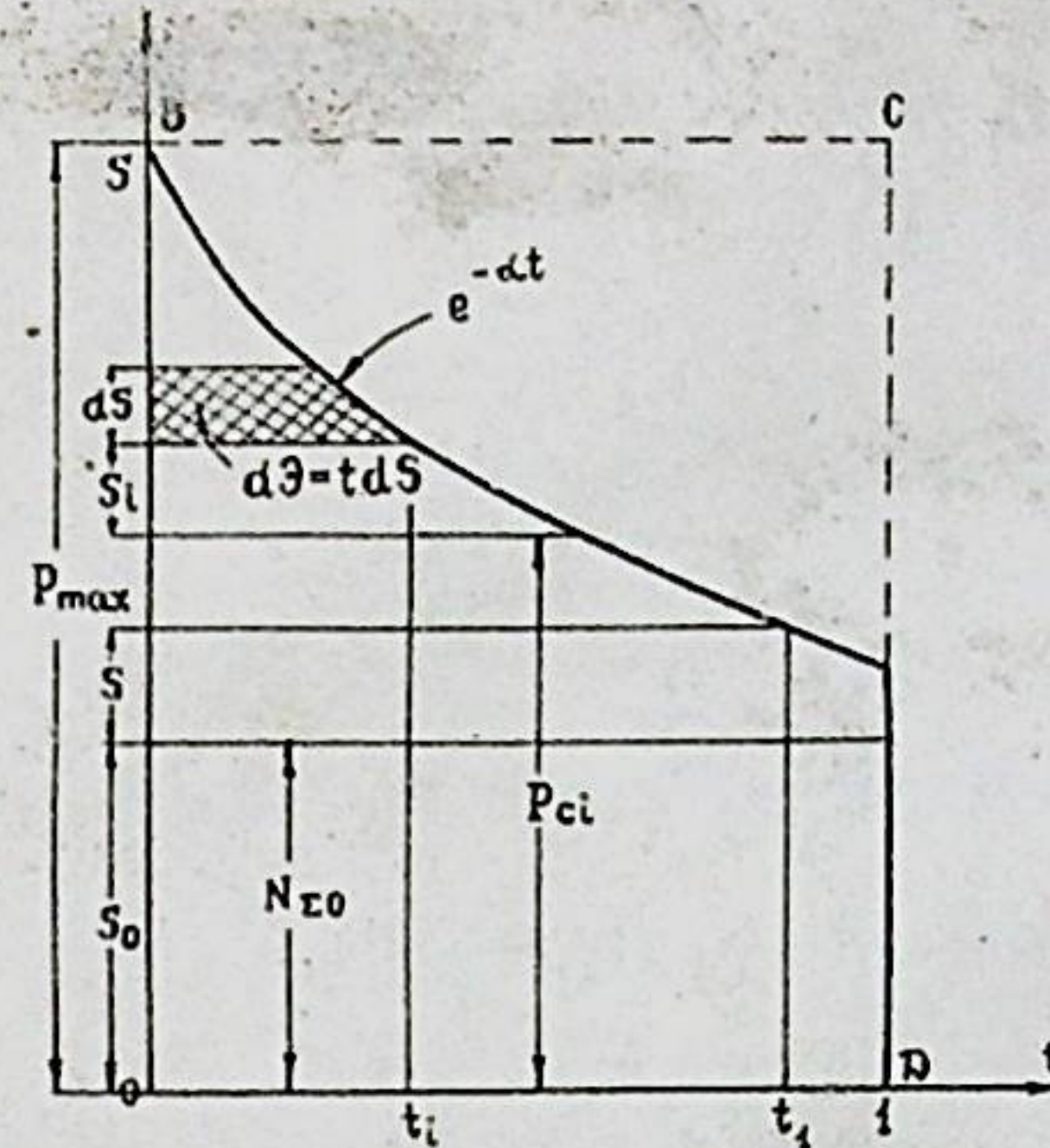


Рис-2

В случае, когда планирование развития энергетической системы возможно вести как за счет ввода мощных базисных, так и специальных пиковых электростанций, а часть существующих электростанций будет занимать промежуточное положение в графике нагрузки, задача по оптимизации развития энергосистемы и выбора ее рациональной структуры сводится к определению оптимального соотношения между вводимыми мощностями базисных и пиковых электростанций на перспективу. В этом случае уравнения балансов мощностей и энергии системы можно представить в виде:

$$\Psi_t = \sum_{i=1}^n N_{ai} + \sum_{j=1}^m N_{bj} + N_{ec} - P_c = 0, \quad (2-10)$$

$$\sum_{i=1}^n \Xi_{ai} + \sum_{j=1}^m \Xi_{bj} + \Xi_{ec} - \Xi_c = 0, \quad (2-11)$$

где

$N_n, N_b, N_{\epsilon c}$  - соответственно мощности пиковых, базисных и существующих электростанций системы;

$\mathcal{E}_n, \mathcal{E}_b, \mathcal{E}_{\epsilon c}$  - выработка электроэнергии на соответствующих группах электростанций.

Обозначая относительные величины мощности этих электростанций соответственно через  $S_n, S_b, S_c$ , а через  $S_0$  - относительную величину мощности существующих электростанций, покрывающих часть базиса графика нагрузки, составляется математическая модель структуры генерирующих мощностей энергосистемы. Аналогично первому случаю, топливная составляющая годовых издержек группы базисных и пиковых электростанций соответственно выразится в виде:

$$U_{Tb} = P_{\max} T \left[ -\frac{a_b}{\alpha} \left\{ (S_0 + S_b) \left[ \ln(S_0 + S_b) - 1 \right] - S_0 (\ln S_0 - 1) \right\} + b_b S_b \right], \quad (2-12)$$

$$U_{Tn} = P_{\max} T \left[ -\frac{a_n}{\alpha} \left\{ (S_0 + S_b + S_c + S_n) \left[ \ln(S_0 + S_b + S_c + S_n) - 1 \right] - (S_0 + S_b + S_c) \left[ \ln(S_0 + S_b + S_c) - 1 \right] \right\} + b_n S_n \right] \quad (2-13)$$

Тогда критерий оптимальности запишется в виде:

$$U_{\epsilon}^c(S_b, S_n) = P_{\max} T \left[ -\frac{a_b}{\alpha} \left\{ (S_0 + S_b) \left[ \ln(S_0 + S_b) - 1 \right] - S_0 (\ln S_0 - 1) \right\} + b_b S_b - \frac{a_c}{\alpha} \left\{ (S_0 + S_b + S_c) \left[ \ln(S_0 + S_b + S_c) - 1 \right] - (S_0 + S_b) \left[ \ln(S_0 + S_b) - 1 \right] \right\} + b_c S_c - \frac{a_n}{\alpha} \left\{ (S_0 + S_b + S_c + S_n) \left[ \ln(S_0 + S_b + S_c + S_n) - 1 \right] - (S_0 + S_b + S_c) \left[ \ln(S_0 + S_b + S_c) - 1 \right] \right\} + b_n S_n \right] + P_{\max} (L_b S_b + L_n S_n) + U_0 = \min$$

Для нахождения минимума функции (2-14), с соблюдением

визия (2-10), составляется вспомогательная функция Лагранжа:

$$\Phi(S_b, S_n, \lambda) = U_{\epsilon}^c(S_b, S_n) + \lambda \Psi = \min. \quad (2-15)$$

Система уравнений, удовлетворяющих требованию (2-15) и условию (2-10), представляется в виде:

$$P_{\max} T \left\{ -\frac{a_b}{\alpha} \ln(S_0 + S_b) + b_b - \frac{a_c}{\alpha} \left[ \ln(S_0 + S_b + S_c) - \ln(S_0 + S_b) \right] - \frac{a_n}{\alpha} \left[ \ln(S_0 + S_b + S_c + S_n) - \ln(S_0 + S_b + S_c) \right] \right\} + P_{\max} L_b + \lambda = 0, \quad (2-16)$$

$$P_{\max} T \left\{ -\frac{a_n}{\alpha} \ln(S_0 + S_b + S_c + S_n) + b_n \right\} + P_{\max} L_n + \lambda = 0.$$

Исключая  $\lambda$  и заменяя переменные  $S_b$  и  $S_n$  соответствующими им значениями переменных  $t_b$  и  $t_n$ , система уравнений (2-16) сводится к одному уравнению:

$$T \left[ -t_b (a_c - a_b) - t_n (a_n - a_c) + (b_b - b_n) \right] + (L_b - L_n) = 0. \quad (2-17)$$

Учитывая, что  $S_c$  определяется из условия

$$S_c = e^{-a t_n} - e^{-a t_b}, \quad (2-18)$$

и решая совместно (2-18) и (2-17), получаем одно уравнение с  $t_b$  в виде:

$$A \ln(S_c + e^{-a t_b}) + B - t_b = 0, \quad (2-19)$$

где

$$A = \frac{a_n - a_c}{\alpha(a_c - a_b)}, \quad B = \frac{T(b_b - b_n) + (L_b - L_n)}{T(a_c - a_b)}.$$

Решение уравнения (2-19) относительно  $t_b$  в явном виде невозможно, поскольку в нем имеется член, содержащий логарифм также экспоненциальную функцию  $e^{-a t_b}$ , поэтому в уравнение (2-19) решается графическим методом. С этой целью,



обозначив левую часть (2-19) через "y", строится кривая  $y=f(t_s)$  (рис.3), пересечение которой с осью  $ot$  и дает искомое значение  $t_s$ . Поднимаясь далее от точки пересечения  $t_s$  до встречи с кривой  $e^{-at}$ , определяется отрезок, равный сумме  $S_0+S_c$ , которая, в абсолютном выражении, представит сумму мощностей  $N_{sc}+N_b=N$ . Поскольку первое слагаемое есть величина заданная, определяется однозначно.

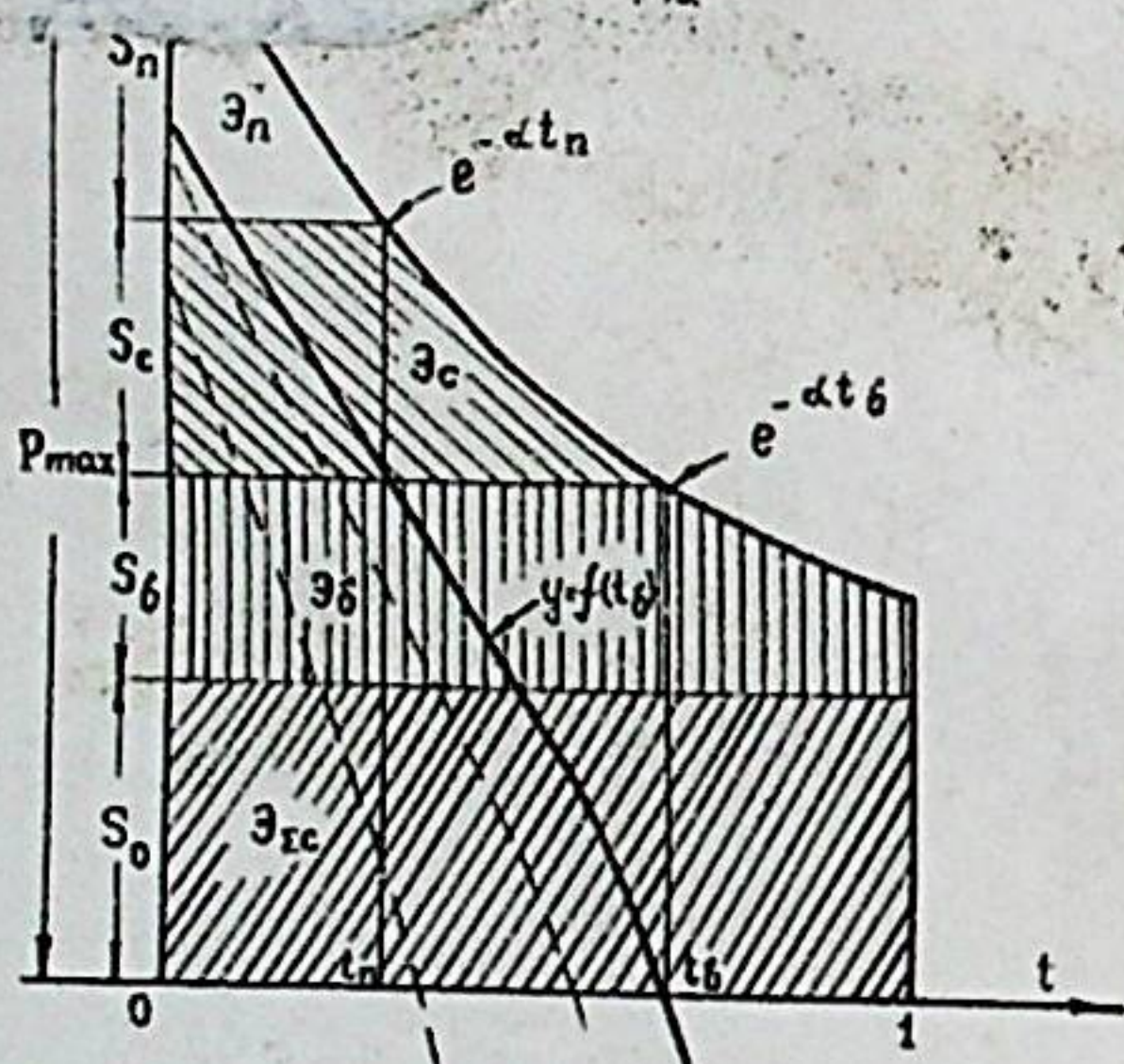


Рис.3

Определяя таким образом  $t_s$ , значение неизвестной  $t_n$ , что то же и значение  $N_n$ , находится так же однозначно.

Как видно из выражения (2-19), значение величины  $t_s$  всецело определяется соотношением энергоэкономических параметров вновь вводимых электростанций системы, в частности соотношением стоимостей установленных киловатт пиковых и базисных электростанций ( $L_n$  и  $L_s$ ), а также издержек по топливу ( $a_i$  и  $b_i$ ) на всех тепловых электростанциях, включая и группу старых тепловых электростанций, меняющих режим своей работы.

Необходимым условием существования решения является пересечение кривой  $y=f(t_s)$  с осью  $ot$ , что будет иметь место,

если  $B < 0$ . Это положение объясняется следующим: т.к. величина  $t_s < 1$ , то и член  $e^{-at_s} < 1$ , а  $S_c < 1$  (по условию), тогда  $\ln(S_c + e^{-at_s})$ , начиная с определенного момента, будет величиной отрицательной, и поскольку  $A > 0$ , кривая  $y=f(t_s)$  пересечет ось  $ot$ . Последнее будет иметь место только тогда, когда пиковые электростанции имеют меньшую стоимость установленного киловатта по сравнению с мощными базисными станциями и меньшие издержки по топливу,

в зоне графика нагрузки. Если же, отношение между  $L_i$ ,  $a_i$  и  $b_i$  будет таким, при котором "B" окажется больше нуля и по абсолютной величине превысит первый член (2-19), кривая  $y=f(t_s)$  не пересечет ось  $ot$ . В этом случае оптимальным будет вариант ввода только пиковой электростанции, с увеличением выработки электроэнергии за счет более полной загрузки существующих электростанций системы.

С другой стороны, чем ближе кривая  $y=f(t_s)$  будет ложиться к оси  $os$  (пунктирные кривые), тем меньше будет величина  $t_s$ , тем большей, при прочих равных условиях, будет мощность вновь вводимой электростанции, планируемой для работы в базисной части графика нагрузки. Возможен случай, при котором соотношения между экономическими и энергоэкономическими показателями электростанций рассматриваемых типов будет таким, что  $S_c = 1 - (S_0 + S_c)$ . Последнее свидетельствует о том, что на данном этапе развития энергетической системы, для покрытия прироста нагрузки, оптимальным будет вариант ввода только мощной базисной электростанции а покрытие пиковых нагрузок возложится на долю старых, менее экономичных электростанций.

Общим случаем планирования развития энергетических систем

будет померенный ввод как пиковых, так и базисных электростанций.

### 3. Определение экономической эффективности передачи пиковой мощности

Использование межсистемных линий является одним из способов покрытия графиков нагрузки систем и, в частности, их пиковых. В связи с этим значительную актуальность приобретают вопросы исследования целесообразности участия межсистемных перетоков для покрытия пиков графиков нагрузки энергетических систем.

В четвертой главе реферируемой работы сделана попытка применить также метод математического моделирования для количественного определения экономической эффективности передачи пиковой мощности по ЛЭП.

Задача рассматривается применительно к условиям объединения энергосистем Закавказья. До последнего времени потребность в электроэнергии Армянской ССР в основном покрывалась выработкой ГЭС Севан-Разданского каскада. Однако, ввиду недостаточности гидроресурсов республики, для покрытия бурно растущей по-

требности в электроэнергии в настоящее время интенсивно строятся и проектируются тепловые электростанции на привозном топливе, в основном на природном газе, получаемом из Азербайджанской ССР.

Характерной особенностью Севан-Разданского каскада ГЭС является то, что оз.Севан, расположенное в голове каскада, является идеальным многолетним регулятором, а наличие промежуточной БЭС делает систему весьма гибкой, и станции каскада могут

независимый друг от друга режим работы.

Вследствие сокращения попусков воды из оз.Севан резко снизится количество отдаваемой энергии, а также степень использования установленной мощности ГЭС Севан-Разданского каскада. Поэтому часть установленной мощности каскада не будет участвовать в покрытии нагрузки и может рассматриваться как свободная мощность или резервированная мощность объединенной Закавказской энергосистемы.

В работе ставится задача определить экономическую эффективность использования "свободной мощности" ГЭС Севан-Разданского каскада для покрытия острого пика графика нагрузки энергосистемы Азербайджанской ССР, используя существующие линии межсистемной электропередачи и вытесняя конденсационную мощность специальной пиковой электростанции.

В рассматриваемой постановке покрытия пиковых зон графиков нагрузки энергосистем "А" и "Б" ("А" - энергосистема Армении, "Б" - Азербайджана) общий электробаланс, а также покрытие суммарной потребности по мощности, графически представлены на (рис.4а, б).

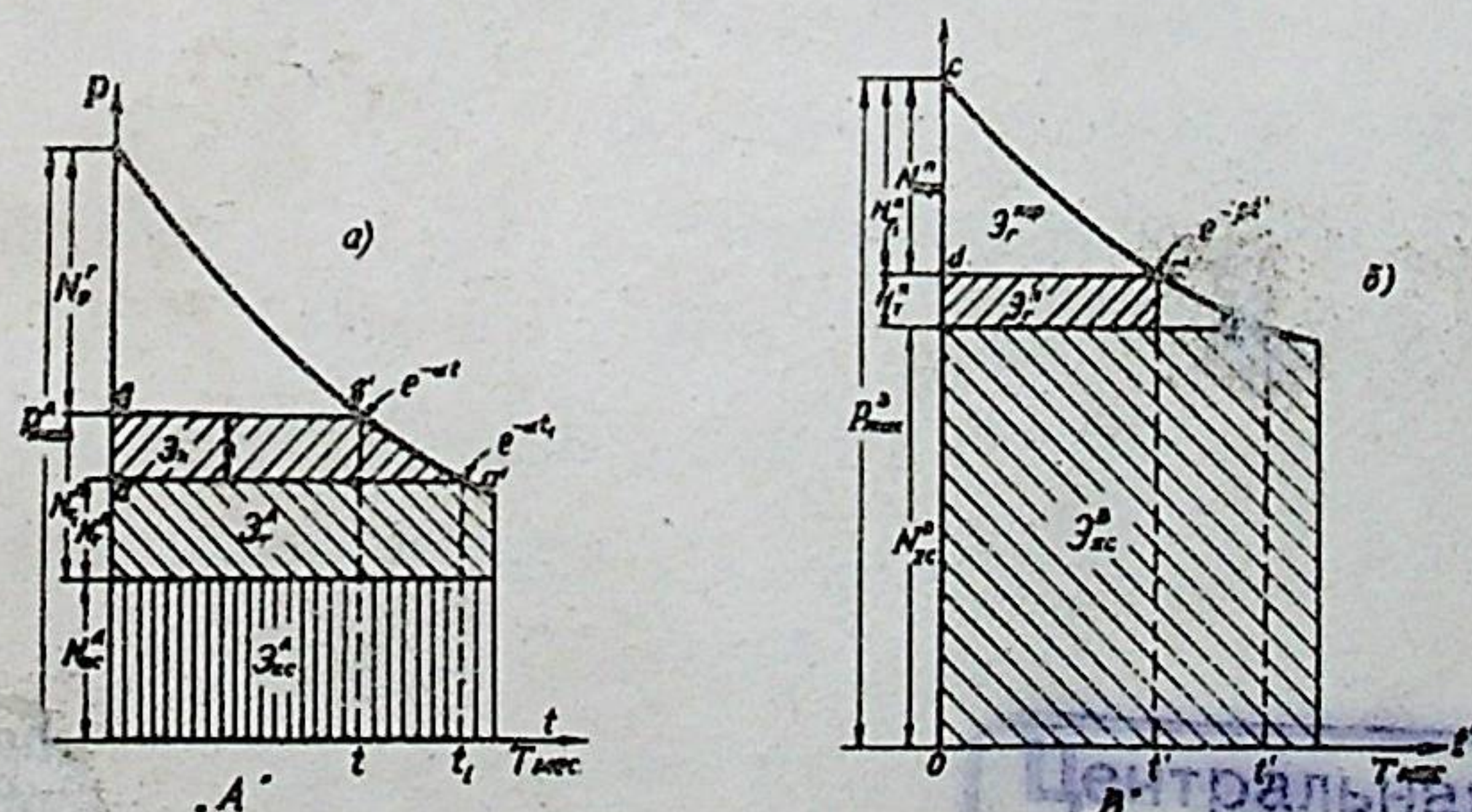


Рис.4

Центральная научная библиотека Академии наук Азербайджанской ССР

Если установленная мощность ГЭС каскада будет  $N_{\Gamma}^G$ , а ее величина, участвующая в покрытии пика графика нагрузки системы "А" -  $N_{\Gamma}^A$ , тогда величина мощности, равная разности  $N_{\Gamma}^G - N_{\Gamma}^A$ , будет считаться свободной. Обозначив через  $P_{max}^A$ , соответствующий максимум нагрузок системы "А" и "В", уравнения баланса энергии по обеим энергосистемам можно записать в виде:

$$P_{max}^A - N_{\Gamma}^A - N_{\Gamma}^B = 0, \quad Z_{\Gamma}^A - Z_{\Gamma}^B - Z_{\Gamma}^A - Z_{\Gamma}^B = 0, \quad (3-1)$$

$$P_{max}^B - N_{\Gamma}^B - N_{\Gamma}^A - N_{\Gamma}^B = 0, \quad Z_{\Gamma}^B - Z_{\Gamma}^A - Z_{\Gamma}^B + Z_{\Gamma}^A = 0, \quad (3-2)$$

где  $N_{\Gamma}^A = N_{\Gamma}^{A_{\text{баз}}} + N_{\Gamma}^A + N_{\Gamma}^{A_{\text{пик}}}$ ; при этом  $N_{\Gamma}^{A_{\text{баз}}}$ ,  $N_{\Gamma}^A$ ,  $N_{\Gamma}^{A_{\text{пик}}}$ ,  $N_{\Gamma}^B$  - соответственно мощности базисного перетока существующих тепловых электростанций сезонных ГЭС и тепловой базисной электростанции, вновь вводимой в систему "А";  $Z_{\Gamma}^A$ ,  $Z_{\Gamma}^B$  - выработка электроэнергии на соответствующих электростанциях.

Аналогично для системы "В":

$N_{\Gamma}^B$ ,  $N_{\Gamma}^A$ ,  $N_{\Gamma}^B$  - соответственно суммарная мощность существующих до расчетного периода электростанций и мощности вновь вводимых базисных и пиковых электростанций;  $Z_{\Gamma}^B$ ,  $Z_{\Gamma}^A$ ,  $Z_{\Gamma}^B$  - выработка электроэнергии на соответствующих электростанциях.

При покрытии пика графика нагрузки системы "В" свободной мощностью каскада  $N_{\Gamma}^G$  необходимо соблюдать условия расхода заданного количества воды в каскаде. Поэтому, при расчетах сумма площадей графиков нагрузок обеих энергосистем, находящихся в каскаде, должна всегда оставаться

той же.

Для решения поставленной задачи исходим из следующего положения: от линии  $aa'$  (рис.4а) отсекается площадь  $abb'a'$ , высотой  $h$ , тогда количество электроэнергии, равное в соответствующем масштабе этой площади, при наличии возможности регулирования каскада, может быть передано в систему "В" для покрытия острого пика, равного площади  $acc'$  (рис.4б). При этом переданная пиковая мощность будет равна  $N_{\Gamma}^A$ , что даст возможность уменьшить на эту же величину мощность вновь вводимой пиковой электростанции. Для покрытия же нагрузки, равной  $h$  в системе "А", увеличивается мощность базисной электростанции на эту же величину, причем  $N_{\Gamma}^A \gg h$ . Таким образом, варьирующей величиной становится величина  $h$ ; чем больше  $h$ , тем большее количество энергии можно передать в систему "В" и вытеснить тем большую мощность пиковой электростанции и соответственно уменьшить денежные затраты. С другой стороны, увеличение мощности базисной электростанции в системе "А" на величину  $h$  потребует дополнительных расходов денежных средств.

Поэтому оптимальная величина  $h$  должна определяться путем технико-экономического расчета.

Принимая за критерий оптимальности "минимум расчетных затрат" по объединенной системе в целом, оптимизирующая функция записывается в следующем виде:

$$L_A + (Z_{\Gamma}^A + Z_{\Gamma}^B) \delta_A + N_{\Gamma}^A + N_{\Gamma}^B L_n + Z_{\Gamma}^A \delta_n + N_{\Gamma}^A L_{\text{пик}} + Z_{\Gamma}^B C_{\text{пик}} + N_{\Gamma}^B = \min, \quad (3-3)$$

$L_i$  - эксплуатационные расходы на элемент  $i$

там системы;

$\delta_i$  - удельные издержки по топливу;

$N_{ес}$  - издержки по существующим электростанциям, независящие от пе  
ых параметров;

$C_{пер}$  - издержки по передаваемой электроэнергии.

и (3-3) на экстремум (минимум) должно  
ний по энергии и мощности:

$$Z_k - Z_r = 0 \quad (3-4)$$

$$N_{пер} + h \leq N_{ес} \quad (3-5)$$

где  $Z_k$  - количество электроэнергии, которую ГЭС каскада могут вырабатывать при заданном объеме воды;  
 $Z_r$ ,  $Z_{пер}$  - соответственно энергия ГЭС каскада, покрывающая пиковые зоны графиков нагрузки энергосистем "А" и "В".

Используя закон изменения кривой продолжительности графика нагрузки в виде (I-I), переменные  $h$ ,  $Z_k$ ,  $N_{пер}$ ,  $Z_{пер}$  и другие выражаются в функции переменных  $t$  и  $t'$ . Из рис. 4а видно, что

$$h = P_{max}^A S_h = P_{max}^A (e^{-\beta t} - e^{-\beta t'}) \quad (3-6)$$

$$N_{пер} = P_{max}^B S_i = P_{max}^B (1 - e^{-\beta t'}) \quad (3-7)$$

Интегрируя функцию  $e^{-\beta t}$  в пределах от 0 до  $t'$ , определяем величину  $Z_{пер}$  в виде:

$$Z_{пер} = P_{max}^B \int_0^{t'} e^{-\beta t} dt = P_{max}^B \left[ \frac{1}{\beta} (1 - e^{-\beta t'}) - t' e^{-\beta t'} \right],$$

где  $\beta$  - фактор нагрузки системы "В".

Аналогично определяется величина  $Z_h$  для системы "А":

$$Z_h = P_{max}^A \int_0^{t_1} e^{-\beta t} dt - \int_0^{t_1} e^{-\beta t} dt = P_{max}^A \left[ e^{-\beta t} \left( \frac{1}{\beta} - t \right) + t_1 \right] \quad (3-9)$$

Значение  $t_1$  определяется из условия, ко  
энергия каскада ГЭС покрывает пиковую  
стемы "А". Потери мощности и площади dсс'  
определены в виде: будет

$$\Delta N_n = K P_{max}^B (1 - e^{-\beta t'})^2 \quad (3-10)$$

$$\Delta Z_n = P_{max}^B K \int_0^{t'} (1 - e^{-\beta t'})^2 dt' = P_{max}^B K \left( t' + \frac{2}{3} e^{-\beta t'} - \frac{1}{2\beta} e^{-2\beta t'} - \frac{3}{2\beta} \right) \quad (3-11)$$

где  $K = \frac{R}{V}$ ,

$R$  - омическое сопротивление ЛЭП;

$V$  - номинальное напряжение, принимаемое постоянным.

Учитывая (3-6), (3-7), (3-8), (3-9) и (3-11), выражение (3-3) в функции переменных  $t$  и  $t'$  переписется в виде:

$$M_1 + P_{max}^A e^{-\beta t} [(L_A - L_P) + T \delta_A \frac{1}{2} (1 + \beta t)] + P_{max}^B e^{-\beta t'} [(L_n - L_{пер}) + T \frac{1}{\beta} (1 + \beta t') (\delta_n - \dots)] = \min \quad (3-12)$$

где  $M_1$  - постоянная, включающая все члены, независящие от  $t$  и  $t'$ .

Аналогично выражая в функции  $t$  и  $t'$  величины  $Z_k$  и  $Z_r$ , условие ограничения по энергии (3-4) запишем в виде:

$$P_{max}^A e^{-\beta t} \left( \frac{1}{2} + t \right) + P_{max}^B \left[ e^{-\beta t'} \left( \frac{1 - 2K}{\beta} + t' \right) + \frac{K}{2\beta} e^{-2\beta t'} - K t' \right] - M = 0 \quad (3-13)$$

где

$$M = P_{\max}^A e^{-\lambda t} \left( \frac{1}{\alpha} + t \right) + P_{\max}^B \left( \frac{2-3\kappa}{2\beta} \right).$$

Для нахождения минимума (3-12), с соблюдением условия связи в виде (3-13), составляется вспомогательная функция Лагранжа:

$$\Phi(t, t', \lambda) = \Psi_{\text{рз}}(t, t') + \lambda \Psi(t, t') = \min. \quad (3-14)$$

Система уравнений, удовлетворяющих требованию (3-14),

будет:

$$(L_A - L_P) + T \delta_A t + \lambda t = 0, \quad (3-15)$$

$$\kappa \lambda (e^{\beta t'} + e^{-\beta t'}) + \beta T t (\delta_n - C_n) + \beta (L_n - L_{\text{пер}}) - 2\lambda \kappa = 0.$$

Исключая из уравнений (3-15), а также учитывая условие (3-13), получаем два уравнения с переменными  $t$  и  $t'$  в виде:

$$t = \frac{(L_A - L_P) [\beta t' - 2\kappa + \kappa (e^{\beta t'} + e^{-\beta t'})]}{\beta T t' (\delta_n - C_n - \delta_A) - \kappa T \delta_A (e^{\beta t'} + e^{-\beta t'} - 2) + \beta (L_n - L_{\text{пер}})}, \quad (3-16)$$

$$P_{\max}^A e^{-\lambda t} \left( \frac{1}{\alpha} + t \right) + P_{\max}^B \left[ e^{\beta t'} \left( \frac{1-2\kappa}{\beta} + t' \right) + \frac{\kappa}{2\beta} e^{-2\beta t'} - \kappa t' \right] - M = 0.$$

Решение уравнений (3-16) относительно  $t$  и  $t'$  в явном виде не представляется возможным. Поэтому в работе предлагается графо-аналитический способ решения. С этой целью второе уравнение (3-16) представляется в виде равенства двух функций

$$f_1(t) = M - f_2(t'), \quad (3-17)$$

затем, учитывая пределы изменения  $t$  и  $t'$ , строятся  $f_1(t)$  и  $f_2(t')$  (рис. 5а).

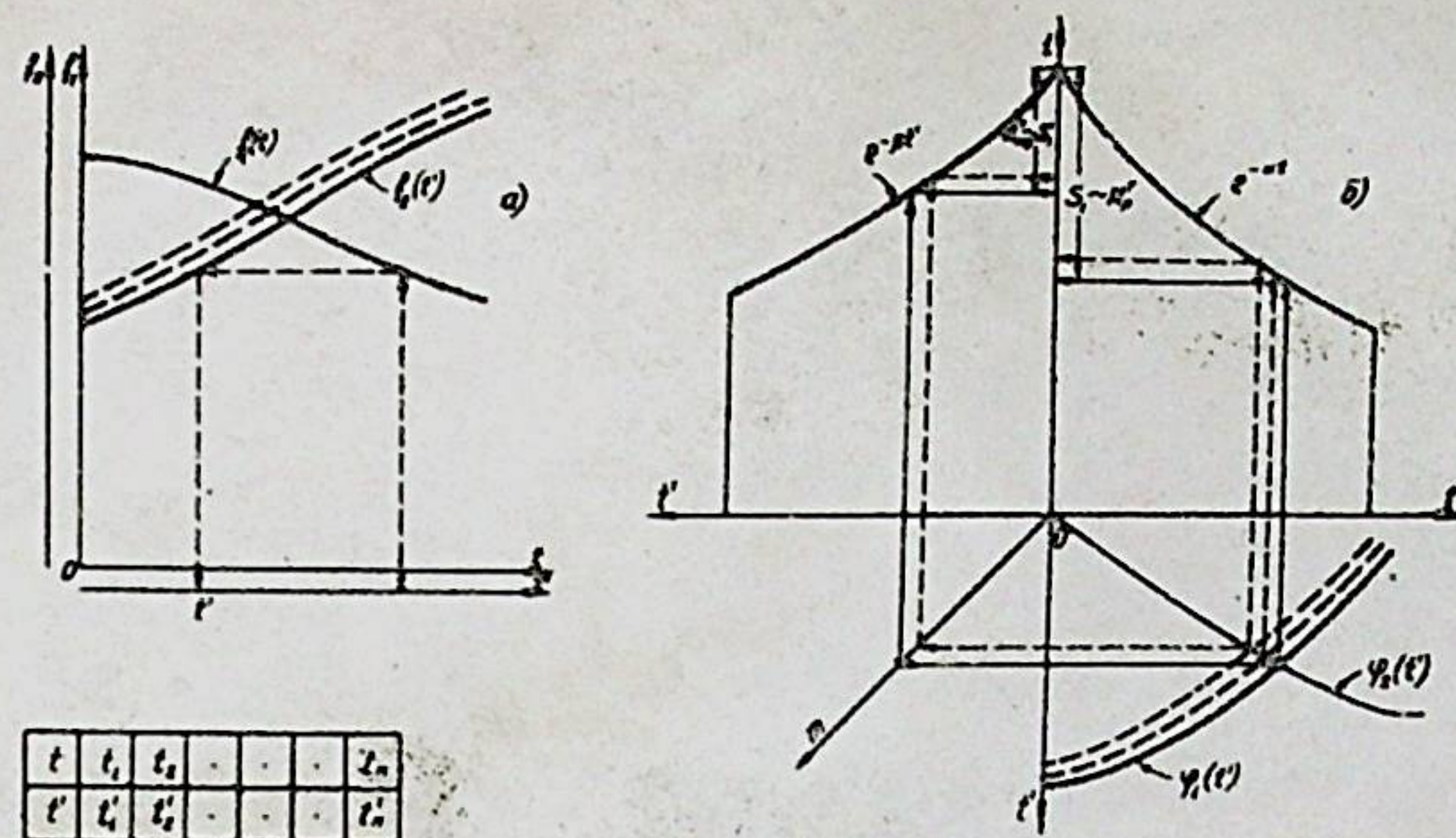


Рис. 5

Используя равенство (3-17), составляется таблица значений  $t$  и  $t'$ , по данным которой строится новая кривая  $t = \varphi_1(t')$  (рис. 5б). По первому уравнению (3-16), придавая ряд значений  $t'$ , строится другая зависимость  $t$  от  $t'$ , т.е.  $t = \varphi_2(t')$ . Пересечение кривых  $t = \varphi_1(t')$  и  $t = \varphi_2(t')$  и даст искомые значения  $t$  и  $t'$ . Зная величины  $t$  и  $t'$ , по кривым продолжительности графиков нагрузки систем "А" и "В" находятся соответствующие оптимальные мощности  $N_p^r$  и  $N_{\text{пер}}^n$  (рис. 5б).

Предлагаемый метод определения экономической эффективности передачи пиковой мощности дает возможность не только находить оптимальную величину передаваемой пиковой мощности, но и исследовать качественное влияние всех основных параметров на эту величину.

1. На современном этапе вопросы оптимизации путей развития энергетических систем, а также покрытия графиков нагрузки, особенно их пиковых необходимо решать путем построения математической модели структуры генерирующих мощностей.

2. Одним из основных факторов, влияющих на выбор оптимальной структуры генерирующих мощностей, а также на пути покрытия пиковых графиков нагрузки, являются абсолютный рост и режим электропотребления, которые обуславливают конфигурацию графиков нагрузки.

Как показал анализ фактических материалов по энергосистемам Закавказья, рост электропотребления сопровождается интенсивным разуплотнением графиков электрической нагрузки.

3. Основой построения математической модели энергетической системы рекомендуется принимать аналитическое выражение кривой продолжительности графика нагрузки в виде (1-1). Сопоставление предлагаемой формулы с рядом существующих аналитических выражений показало, что наилучшее приближение к кривым продолжительности фактических графиков нагрузки имеет предлагаемая формула, которая дает возможность с большой простотой производить математические обобщения при технико-экономических расчетах.

4. Математическим аппаратом оптимизации структуры энергетической системы, а также способом покрытия пиковых зон графиков нагрузки, с успехом могут служить классические вариационные принципы. Как показали исследования, эти методы дают решение

поставленных задач в наиболее простом и удобном виде, что, в свою очередь, дает возможность провести качественный анализ влияния различных параметров, входящих в оптимальную функцию.

5. Предлагаемая методика решения поставленных задач дает возможность в оптимизирующую функцию включать все основные, как энергетические, так и экономические параметры энергосистем зависящие от определяемых мощностей генерирующих электростанций системы.

6. Определение оптимальной структуры энергосистемы посредством полученного выражения (2-9) для различных графиков нагрузки, т.е. для различного значения параметра  $\alpha$ , дает возможность определять как оптимальные мощности, так и число электростанций, необходимые для покрытия прироста нагрузки энергетической системы на различных этапах ее развития.

7. При учете режима работы существующих электростанций оптимизирующая функция принимает вид (2-14), а решение задачи выполняется посредством (2-19). Последнее дает возможность не только определять зону работы в графике нагрузки как существующих, так и вновь вводимых пиковых и базисных электростанций, но и дает возможность выявить темпы динамики роста пиковых и базисных электростанций при планировании развития энергетических систем.

8. Исследования показали, что использование межсистемных связей для покрытия пиков графиков нагрузки в некоторых конкретных энергосистемах приводит к экономии годовых издержек по объединению в целом, т.к. при этом становится возможным использовать свободные мощности (там, где они имеются) для вытеснения вновь вводимых специальных пиковых электростанций. В этом слу-

чае расчетные издержки представляются в виде (3-12) и оптимальная величина передаваемой пиковой мощности определяется из системы уравнений (3-16).

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах автора.

1. Методика определения оптимальных мощностей пиковых электростанций энергосистемы при ее развитии (в соавторстве с Марковым Е.Д.). "Известия высших учебных заведений" (серия Энергетики), № 12, 1963.
2. Перспективное планирование потребности в электроэнергии. "Сборник научных трудов ЕрПИ", т.22, вып.1, 1965 г.
3. К вопросу определения экономической эффективности передачи пиковой мощности "Известия АН Арм.ССР" (серия ТН), № 4, 1965 г.
4. О режиме электропотребления энергосистем Закавказья. Инфо-экономический бюллетень "Промышленность Армении", № 9, 1965.
5. ; соотношение между вводимыми мощностями пиковых и базисных электростанций, при планировании развития энергетических систем. "Известия АН Арм.ССР" (серия ТН), № 2, 1966 г.