

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

А. Б. Бабаханян

Метод расчета изменения частоты в электроэнергетической системе

(Представлено А. Г. Иосифьяном 3 V 1949)

Поведение частоты в системе недостаточно изучено. Анализ динамики изменения частоты вообще отсутствует. Имеющиеся до последнего времени указания в литературе исходят из статического изменения частоты. На самом деле резкие изменения баланса мощностей генерирования и потребления, а также инерция вращающихся масс агрегатов, регулирующих устройств и регулирующего агента создают изменение частоты системы, имеющее динамический характер.

Поэтому частота в переходных процессах изменяется не по статическим регулировочным характеристикам, а зависит от динамических свойств системы.

До сего времени в литературе не освещены работы по анализу динамики частоты в системе с учетом фактора инерции регулирующего агента. Последнее обстоятельство имеет важное значение, в особенности для гидроэнергетических систем и для систем, где частоту регулируют гидроэлектрические станции.

Попытаемся дать количественный и качественный анализ динамики изменения частоты системы.

Рассмотрим поведение частоты системы при синхронном ее изменении на примере работы одного генерирующего агрегата на обособленную сеть потребителей электроэнергии. Примем для начала условие: $\Delta P_p = 0$ и $\Delta P_v = \text{const}$, где ΔP_p — мощность регулирования и ΔP_v — мощность возмущения.

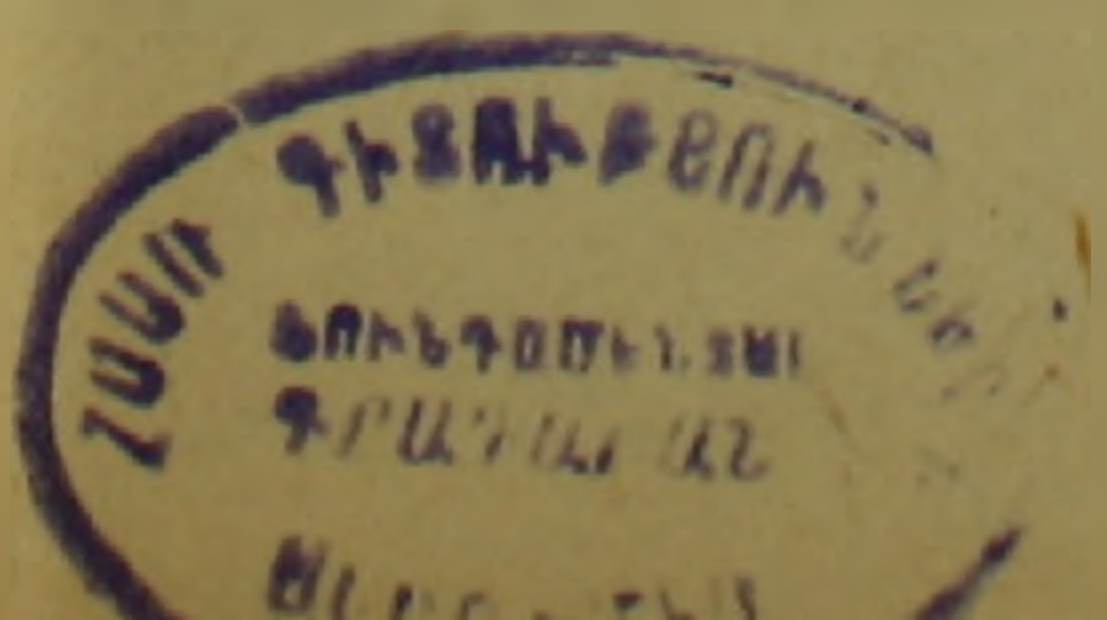
Уравнение вращения агрегата можно представить зависимостью

$$J\Omega \frac{d\Omega}{dt} = \Delta P_v, \quad (1)$$

где J — момент инерции, Ω — механическая угловая скорость.

Подставляя в уравнение (1) значение $\Omega = Af$ (где f — частота системы), получим:

$$JA^2 f \frac{df}{dt} = \Delta P_v \quad (1')$$



Интегрируя по f , будем иметь:

$$\int f df = \int \frac{\Delta P_B}{JA^2} dt,$$

откуда

$$f = \sqrt{\frac{2\Delta P_B}{JA^2} t + C}. \quad (2)$$

Известно, что

$$J = \frac{2\mathcal{E}_j}{\Omega^2}, \quad (3)$$

где $\mathcal{E}_j$ — кинетическая энергия вращения агрегата.

Выражая Ω через синхронную скорость $\Omega_s = A f_{ном}$ и беря $\mathcal{E}_j$ при $\Omega = \Omega_s$, получим:

$$J = \frac{2\mathcal{E}_{js}}{A^2 f_{ном}^2}. \quad (3')$$

Подставляя (3') в (2), получим

$$f_d = \sqrt{\frac{\Delta P_B}{\mathcal{E}_{js}} f_{ном}^2 t + C}. \quad (4)$$

Значение C находим из начальных условий при $t = 0$ $f_d = f_{ном}$ и $C = f_{ном}^2$,

откуда окончательно действительное значение частоты будет

$$f_d = f_{ном} \sqrt{1 + \frac{\Delta P_B}{\mathcal{E}_{js}} t}. \quad (5)$$

Это и есть уравнение, определяющее поведение частоты при отсутствии регулирования и при постоянной мощности возмущения.

Значение ΔP_B может быть как положительным, так и отрицательным, т. к. $\Delta P_B = P_{ген} - P_{пот}$.

Скорость изменения частоты, определяемая из уравнения (5), будет

$$V_f = \frac{df_d}{dt} = \frac{f_{ном}}{2} \frac{\frac{\Delta P_B}{\mathcal{E}_{js}}}{\sqrt{1 + \frac{\Delta P_B}{\mathcal{E}_{js}} t}}. \quad (6)$$

Из уравнения (6) видно, что скорость изменения частоты возрастает как с увеличением мощности возмущения — ΔP_B , так и со временем действия ее при неизменном значении — ΔP_B за переходный период. Если в момент возмущения $f_d = f_t \neq f_{ном}$, то уравнение (5) будет иметь вид

$$f_d = f_{ном} \sqrt{K_{f_t}^2 + \frac{\Delta P_B}{\mathcal{E}_{js}} t}, \quad (7)$$

где $K_{f_t} = \frac{f_t}{f_{ном}}$.

Как видно из уравнения (5), при постоянном значении $\mathcal{E}_{js}$ изменение

частоты будет зависеть от величины ΔP_v и времени ее действия. На рис. 1 показано изменение частоты для различных значений мощности возмущения при $\Delta P_v = \text{const}$, т. е.

$$\frac{\partial \Delta P_v}{\partial t} = 0; \quad \frac{\partial \Delta P_v}{\partial f} = 0; \quad \frac{\partial \Delta P_v}{\partial U} = 0,$$

где U — напряжение сети.

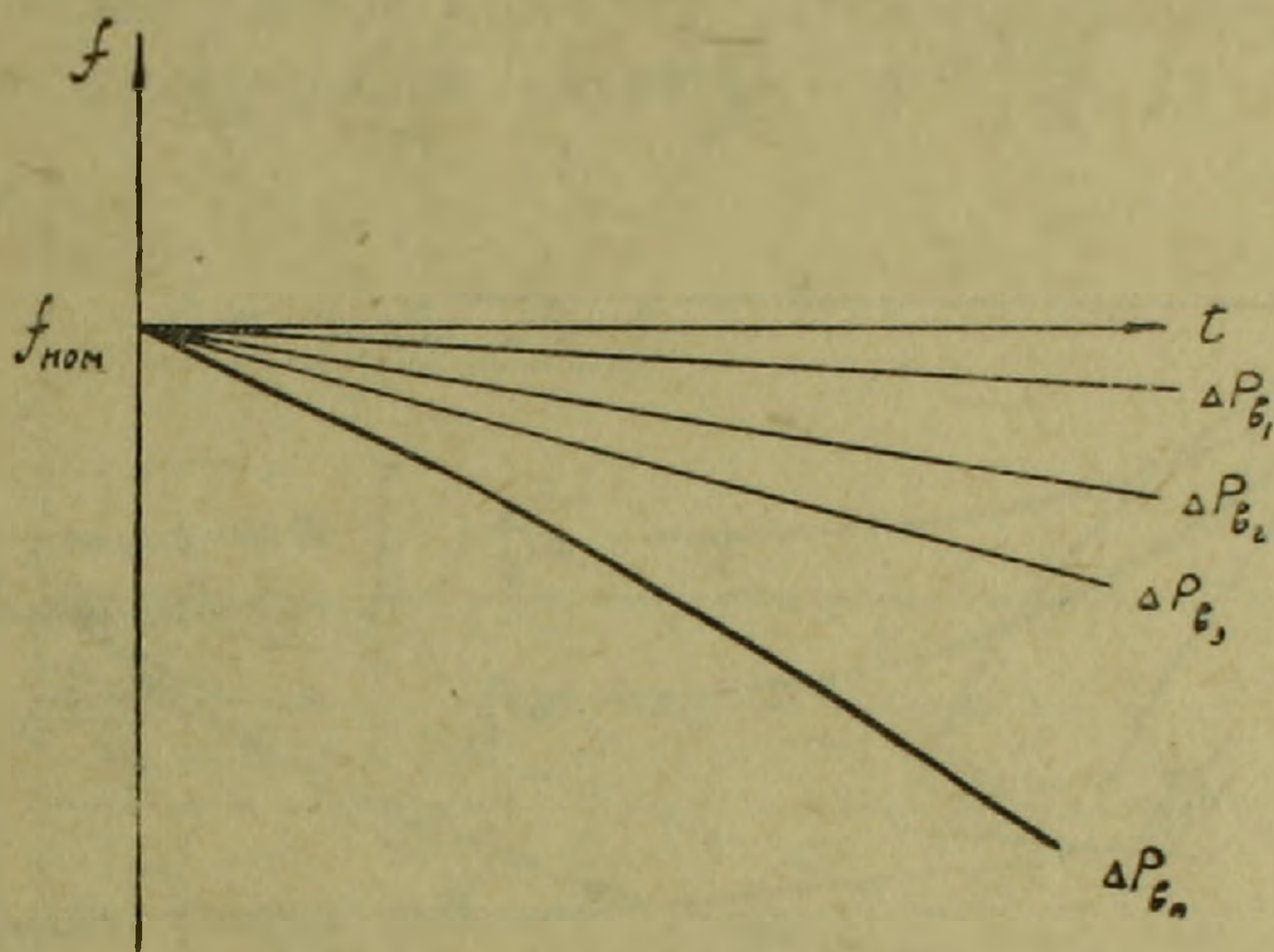


Рис. 1.

В реальных условиях работы генерирующего агрегата на электрическую нагрузку мощность возмущения может изменяться. Это в основном может вызываться: изменением во времени мощности генерирования или потребления, независимыми от f и U факторами, изменением мощности потребления или генерирования вследствие изменения частоты, т. е. условием

$$\frac{\partial \Delta P_v}{\partial f} \neq 0,$$

или изменением мощности потребления вследствие изменения напряжения сети, т. е. условием $\frac{\partial P_{\text{пот}}}{\partial U} \neq 0$.

При условиях $\frac{\partial \Delta P_v}{\partial t} = 0$ и $\frac{\partial \Delta P_v}{\partial f} \neq 0$ и $\Delta P_v = 0$ характер изменения частоты будет иным, чем показано на рис. 1.

Для случая спада частоты, соответствующего отрицательному значению ΔP_v при $\Delta P_v \rightarrow 0$, поведение частоты может быть так же определено по нижеследующему уравнению, решаемому для каждого малого интервала времени

$$f_d = f_{\text{ном}} \sqrt{K_{ft}^2 + \frac{\Delta P_v + \Delta P_c}{\mathcal{E}_{js}}} \Delta t, \quad (8)$$

где $\Delta P_c = \frac{\partial \Delta P_v}{\partial f}$.

Значение ΔP_c должно быть найдено по статической характеристике системы генератор-потребитель, определяемой экспериментальным путем. Значение ΔP_c может быть положительным или отрицательным в зависимости от того, обладает ли система свойством самовыравнивания или саморасстройства. Для вышеуказанных условий поведение частоты в зависимости от различных первоначальных значений ΔP_v будет представляться кривыми, показанными на рис. 2.

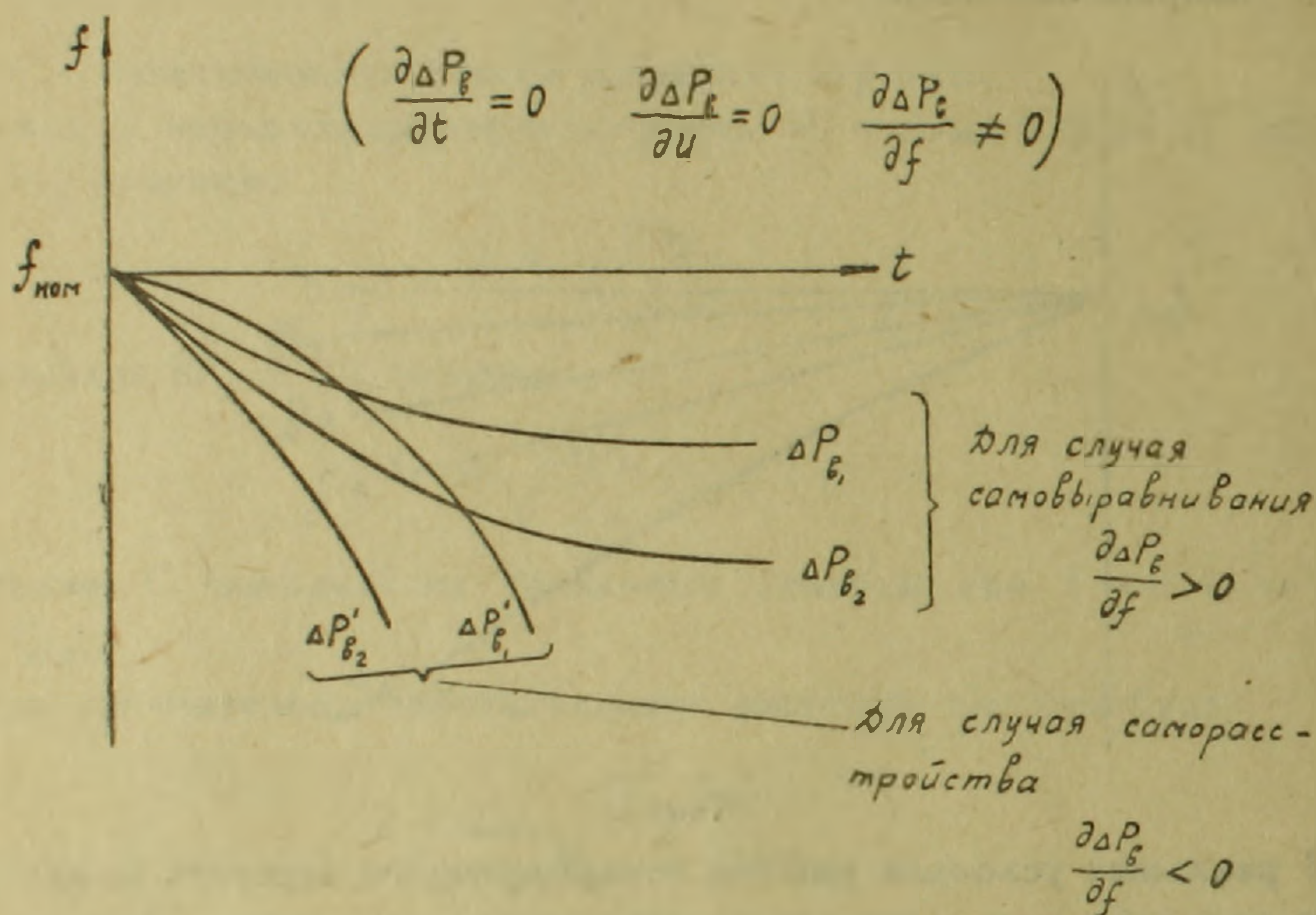


Рис. 2.

При наличии регулирования $\Delta P_p \neq 0$ начало действия мощности регулирования совпадает с моментом $t = t_3$.

Влияние регулирования на процесс изменения частоты может быть найдено по следующей зависимости:

$$f_d = f_{\text{ном}} \sqrt{K_{f_{t_0}}^2 + \frac{\Delta P_v + \Delta P_c + \Delta P_p}{\Xi_{js}} \Delta t_p}, \quad (9)$$

где ΔP_p — мощность регулирования, действующая за малый промежуток времени — Δt_p .

При линейной зависимости функции $\Delta P_p = \xi(P_{yp}, t_p)$ мощность регулирования может быть представлена уравнением

$$\Delta P_p = P_{yp} \frac{\Delta t_p}{2}. \quad (10)$$

Значения t_3 и P_{yp} можно находить экспериментальным путем, описанным ниже.

Для нормальных режимов знаки перед ΔP_v и ΔP_p будут обратными. Таким образом, поведение частоты может быть определено уравнением (9), решаемым для каждого малого интервала времени.

Следует отметить, что знак ΔP_c в уравнении (9) меняется на обратный после точки перегиба кривой изменения частоты.

Можно определить поведение частоты также графическим способом, основанным на вышеуказанных уравнениях. С этой целью строят график функции $f = \varphi(\Delta P_v)$ для различных величин ΔP_v с небольшой разностью между их значениями. Далее, для каждого малого изменения частоты и интервала времени определяется изменение ΔP_v от действия ΔP_c и ΔP_p и соответственно уже разности $\Delta P_v - (\Delta P_c + \Delta P_p)$ переходят от одной кривой к другой. Процесс графического определения частоты представлен на рисунках 3 и 4.

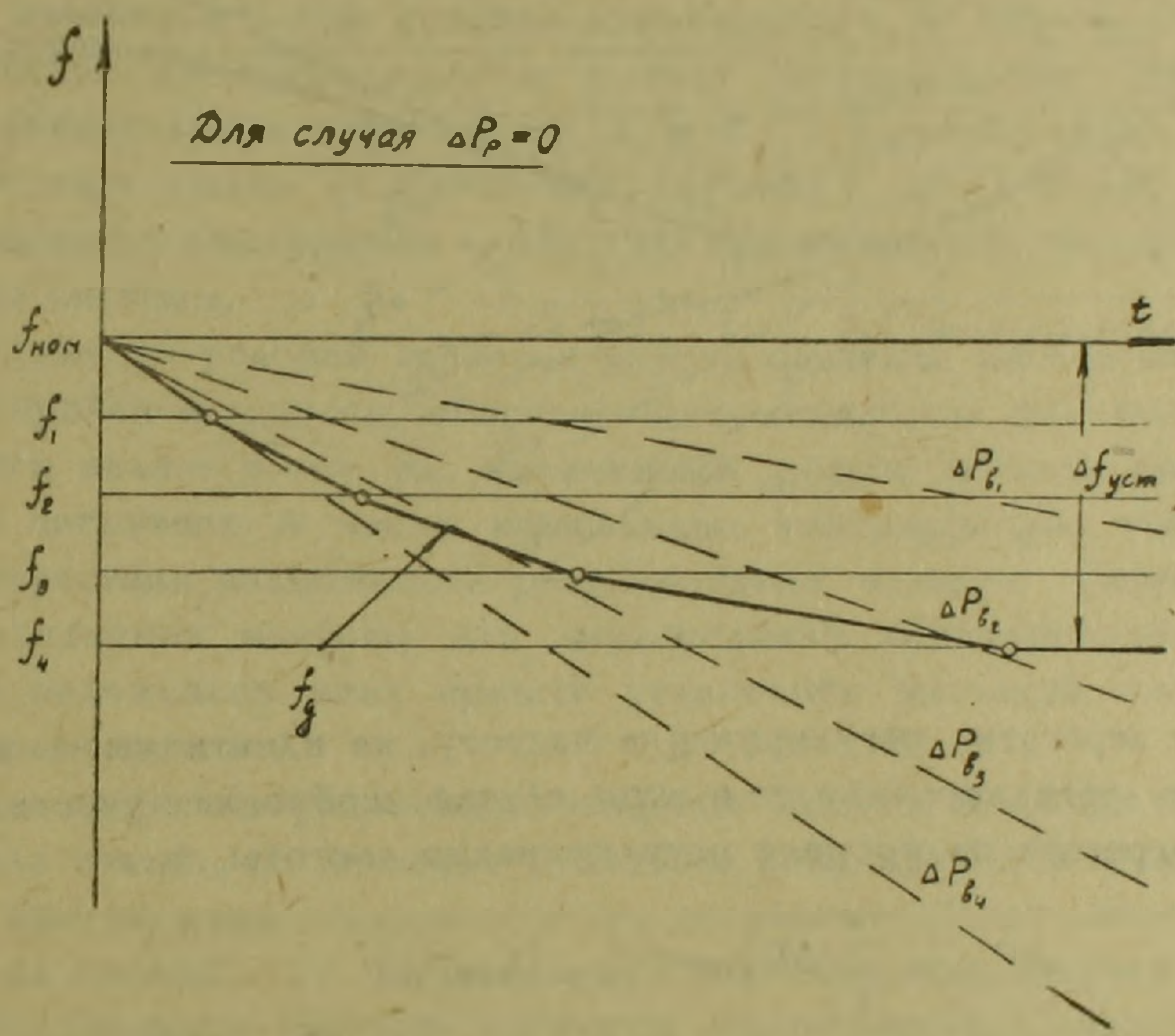


Рис. 3.

Нами был рассмотрен случай работы одного генерирующего агрегата на электрическую сеть. Можно показать, что этот же метод справедлив для определения поведения частоты электроэнергетической системы со значительным количеством генерирующих агрегатов.

Если принять, что регулирование частоты системы производится одним агрегатом, то в этом случае изменение частоты можно определить по вышеприведенным уравнениям. Только при этом $\mathcal{E}_{js}$ будет представлять кинетическую энергию вращения всех вращающихся агрегатов системы, т. е. $\mathcal{E}_c = \sum_1^n \mathcal{E}_{js}$.

При регулировании частоты системы несколькими агрегатами, идентичными как по характеристикам агрегатов, так и по регуляторам и вообще регулирующим устройствам, можно анализ и расчет процесса регулирования и вообще поведения частоты в системе привести к слу-

чаю регулирования частоты одним агрегатом. В этом случае мощность регулирования системы будет определяться так:

$$\Delta P_{pc} = n \Delta P_p, \quad (11)$$

где n — число агрегатов, регулирующих частоту системы.

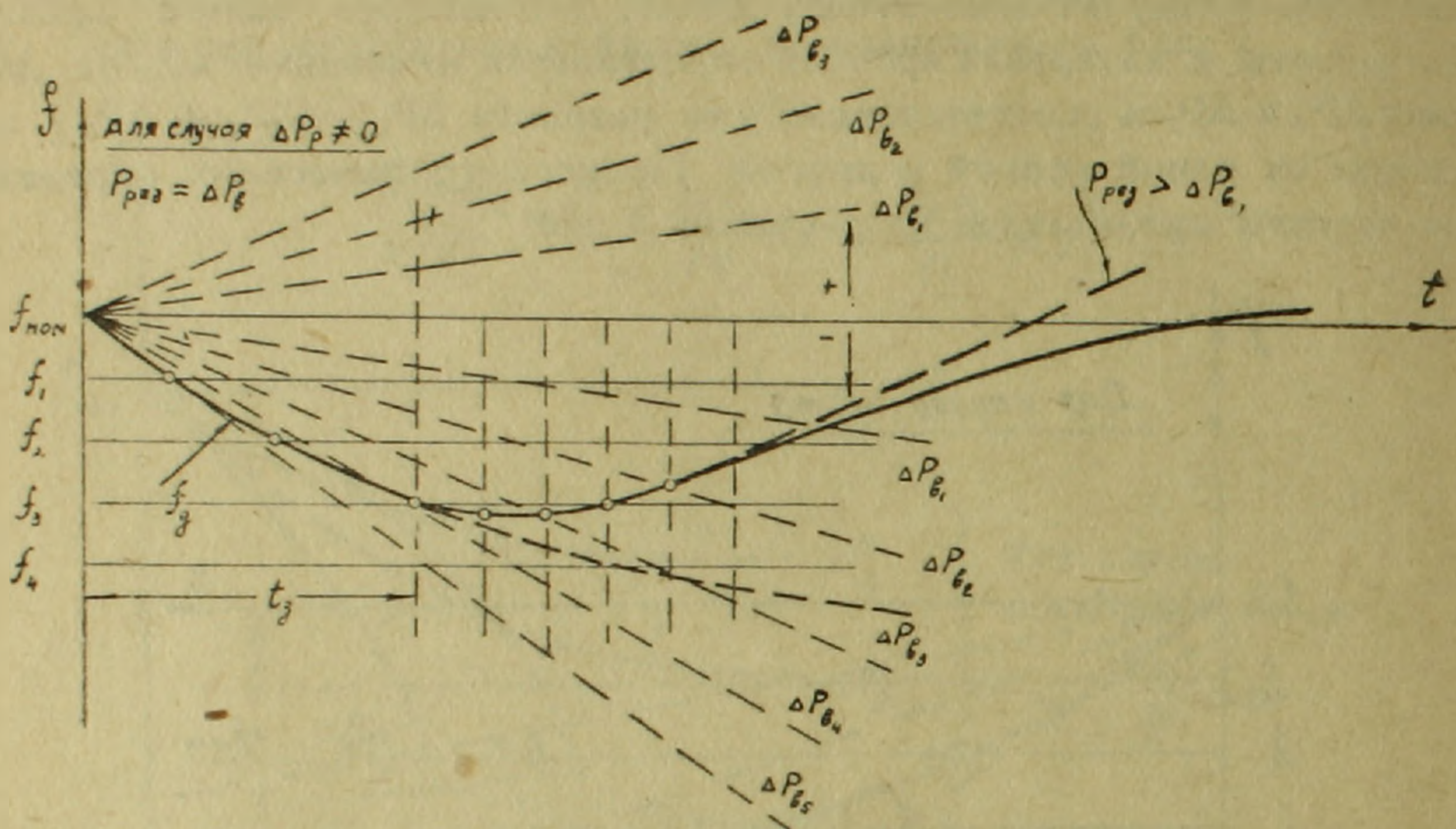


Рис. 4.

Если агрегаты, регулирующие частоту, не идентичны в той или иной части регулирования, то в этом случае необходимо учесть влияние каждого агрегата на процесс регулирования частоты, т. е.

$$\Delta P_{pc} = \sum_1^n \Delta P_p = \varphi(t_3, P_{yp}, t_p). \quad (12)$$

Экспериментальное определение некоторых параметров электроэнергетической системы, влияющих на поведение частоты. Поведение частоты в электроэнергетической системе определяется ее изменением во времени, зависящим от многих факторов, указанных нами выше.

Изменение частоты системы имеет ряд особенностей, характеризующихся амплитудой и продолжительностью отклонения частоты от номинала, скоростью и ускорением самого изменения, а также характером процесса колебания частоты.

В поведении частоты системы особую и значительную роль играют: время запаздывания действия регулирования — t_z , удельная мощность регулирования — $P_{ур}$ и изменение мощности возмущения в зависимости от изменения частоты $\frac{d\Delta P_{в}}{df}$.

При постоянных значениях мощности возмущения ΔP_0 и кинетической энергии вращения агрегатов $\mathcal{E}_k$, динамика изменения и воз-

возможность качественного регулирования частоты зависит от трех вышеуказанных факторов.

Аналитическое определение их значений весьма затруднительно, а иногда почти невозможно. Привлекает внимание возможность экспериментального определения t_3 , $P_{ур}$ и $\frac{d\Delta P_{\text{в}}}{df}$.

При постоянном режиме работы системы значение вышеуказанных параметров остается неизменным. Можно показать, что вообще в электроэнергетических системах при правильном ведении режима работы они могут иметь также постоянное значение. Это положение почти всегда справедливо при условии неизменности в системе регулирующей частоты электростанции и метода регулирования частоты. Для экспериментального определения t_3 и $P_{ур}$ в системе необходимо проведение двух опытов по изменению частоты с одной и той же величиной мощности возмущения — $\Delta P_{\text{в}}$, но при различных условиях регулирования системы.

Одним из условий является работа системы при наличии резерва вращающейся мощности, обеспеченного движущим фактором. Другим условием является тот же неизменный режим работы системы при тех же нагрузках и числе включенных генерирующих агрегатов, но при отсутствии возможности регулирования частоты. Определяя кривую изменения частоты для двух условий регулирования системы, можно наложением этих кривых установить значения интересующих нас параметров.

Как видно из уравнений поведения частоты и их анализа, данных в начале статьи, до момента действия регулирования изменение частоты при наличии резерва и в его отсутствие будет идти по одной и той же кривой, т. к. до момента t_3 значения всех аргументов, влияющих на изменения частоты, остаются неизменными. С начала действия регулирования при $t = t_3$ для условия эксперимента с наличием резерва системы, величина $\Delta P_{\text{в}}$ компенсируется мощностью регулирования — $\Delta P_{\text{р}}$, и поэтому изменение частоты после времени t_3 будет идти по другой кривой, чем при условии отсутствия резерва. Это и является основным положением экспериментального исследования и определения t_3 и $P_{ур}$.

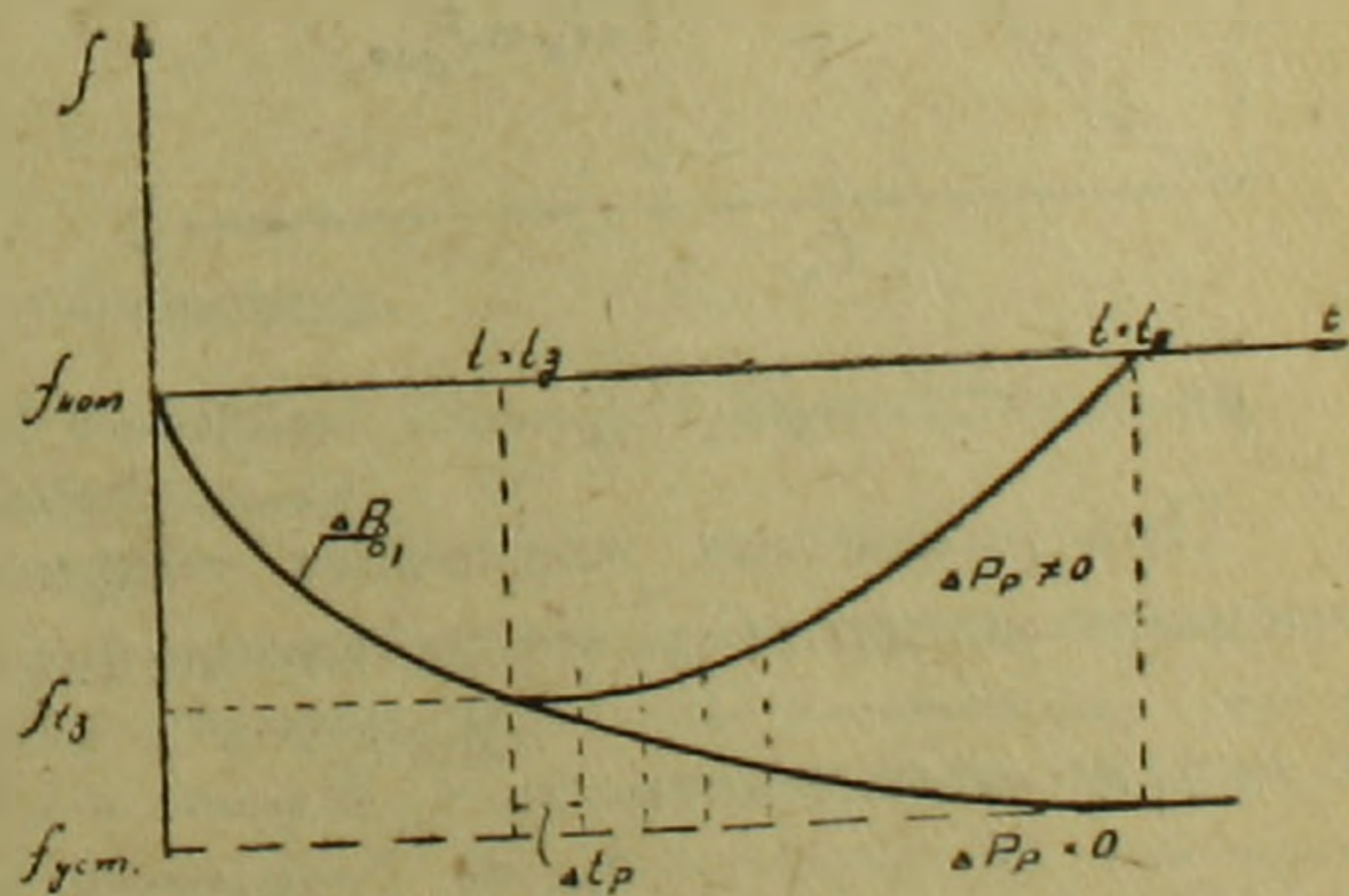


Рис. 5.

На рис. 5 представлены кривые изменения частоты для вышеуказанных двух условий регулирования системы. Точка расхождения этих кривых соответствует времени запаздывания регулирования — t_3 ; отрезок времени от t_3 до

момента восстановления номинального значения частоты будет временем регулирования — t_p .

Из предыдущего известно, что $t_p = \varphi(\Delta P_p)$, и $\Delta P_p = \xi(P_{yp}, t)$. Так как ΔP_p не является постоянной величиной, а изменяется в процессе регулирования, можно ее определить также из рис. 5 с помощью уравнения (9) решаемого относительно ΔP_p

$$\Delta P_p = \left(f_{t_n}^2 - f_{ном}^2 K_{f_{t_{n-1}}}^2 \right) \frac{\Xi_{js}}{f_{ном} \Delta t_p} - (\Delta P_v - \Delta P_c).$$

В последнем уравнении f_d заменено f_{t_n} и $K_{f_t} = K_{f_{t_{n-1}}}$.

Индекс „n“ при t соответствует очередности интервала времени Δt_p . Решая это уравнение для различных точек кривой изменения частоты, полученных экспериментальным путем (см. рис. 5), находим мощность регулирования для каждого малого интервала времени.

При $f_{t_n} = f_{t_{n-1}}$, $\Delta P_p = -(\Delta P_v - \Delta P_c)$.

Последнее условие характеризует установившийся процесс поведения частоты на уровне, соответствующем $\Delta P_c = \frac{d\Delta P_v}{df}$.

Согласно уравнению (10) не трудно получить значение удельной мощности регулирования.

Можно строить графически функцию $\Delta P_p = \xi(P_{yp}, t)$ как показано на рис. 6.

При $\Delta P_p = P_{рез}$ кривая превращается в прямую, параллельную оси абсцисс. Это показано на рис. 6 после времени $t = t_k$. Изменение

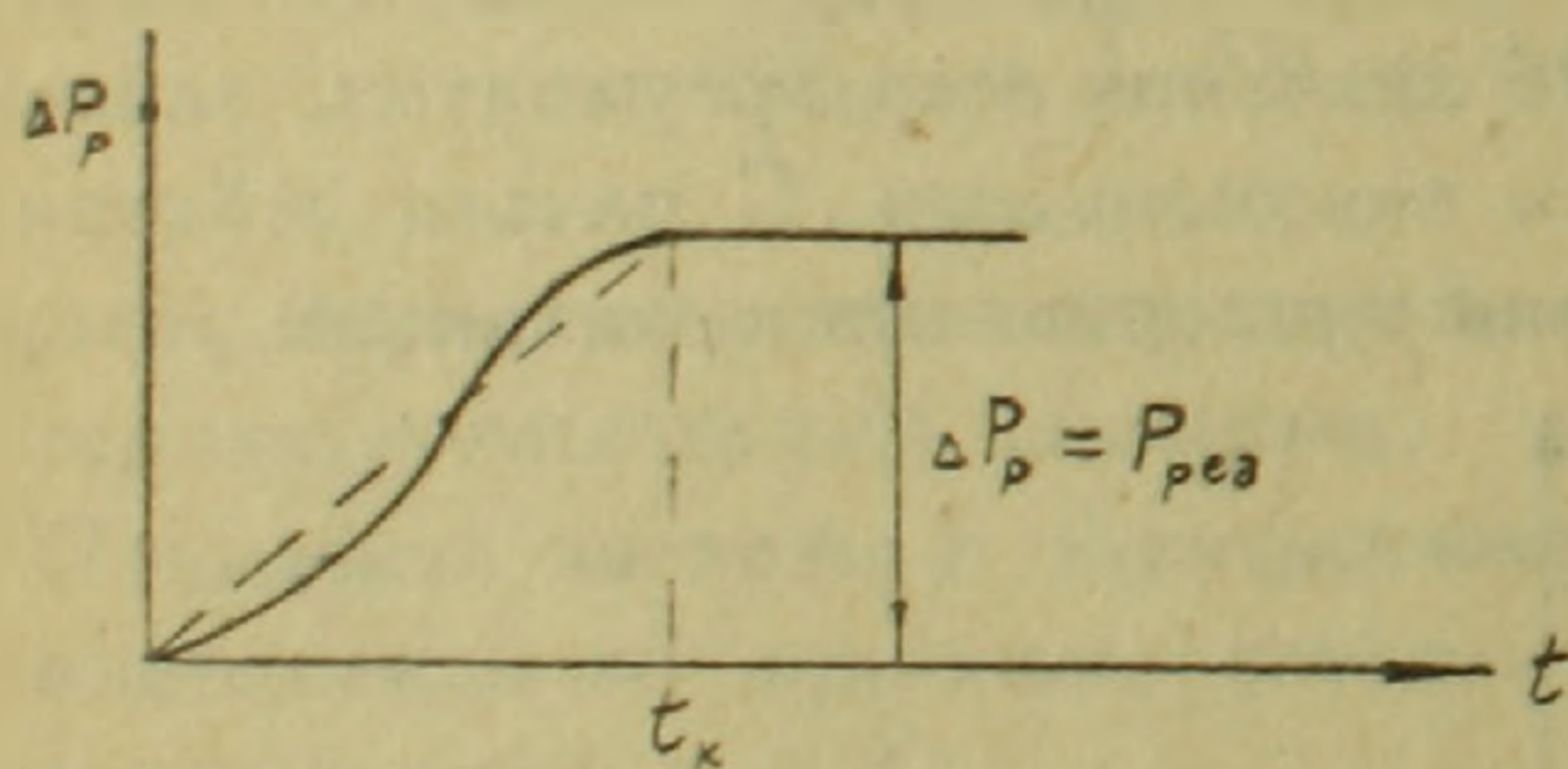


Рис. 6.

мощности возмущения в зависимости от изменения частоты также определяется экспериментальным путем в самой системе. Условие эксперимента следующее: работа системы без возможности автоматического регулирования мощности генерирования при спокойном графике нагрузки.

При различных значениях мощности возмущения определяется изменение частоты до ее установления. По кривым изменения частоты не трудно определить и $\frac{d\Delta P_v}{df}$.

Экспериментально можно определить не только количественную, но и качественную сторону $\frac{d\Delta P_v}{df}$.

В зависимости от системы (ее генерирующих установок, вида и ха-

рактера нагрузок потребителей, свойств регулирования вообще и т. п.) изменение мощности возмущения может быть различным. В одной и той же системе для близких режимов ее работы значение $\frac{d\Delta P_{\text{в}}}{df}$ может быть постоянным. Поэтому, определяя двумя-тремя экспериментами это значение, можно им пользоваться для последующих анализов и расчетов поведения частоты, в особенности для расчета и выбора уставок автоматической разгрузки системы по частоте. На рис. 7 представлены расчетные и экспериментальные кривые изменения частоты для двух мощностей возмущения в одной из электроэнергетических систем нашего Союза.

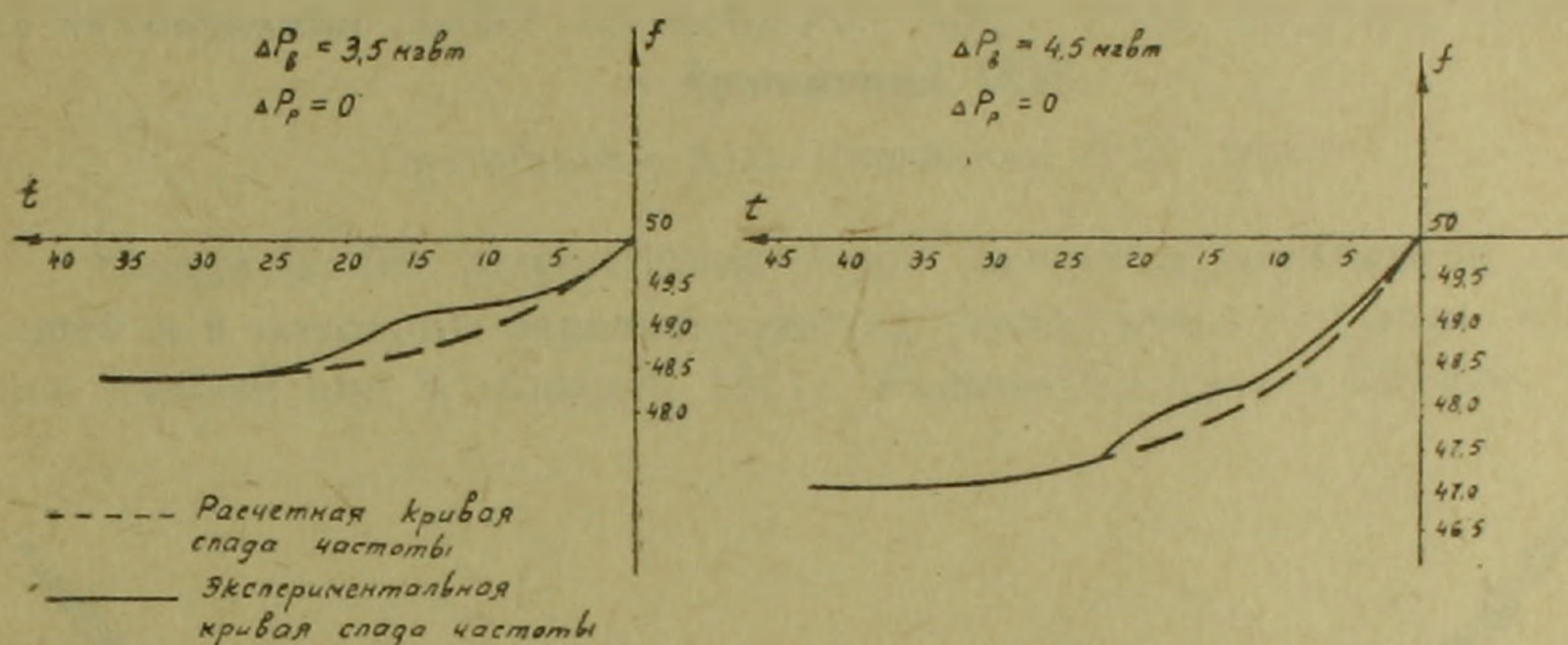


Рис. 7.

Как видно из них, расчетные кривые спада частоты при $\Delta P_{\text{р}} = 0$ близки к экспериментальным. Некоторое расхождение вышеуказанных кривых получилось ввиду колебания нагрузки системы в процессе экспериментов.

Лаборатория Электротехники
Академии Наук Армянской ССР
Ереван, 1948, сентябрь.

Հ. Բ. ԲԱԲՍԻԱՆՅԱՆ

Հաճախականության փոփոխման հաճախական մեթոդը էլեկտրաէներգետիկ սխեմաներում

Մինչև այժմ հայտնի չի հղել որևէ հարմար մեթոդ՝ սխեմաների հաճախականության փոփոխությունները հաշվելու համար: Գրականության մեջ մատնանշվող մեթոդները ելնում են միայն հաճախականության ստատիկ փոփոխություններից: Իրականում հաճախականության փոփոխությունները կատարվում են դինամիկորեն և, հետևաբար, հաճախականության փոփոխությունները կախում ունեն սխեմիի դինամիկ հատկություններից:

Հոդվածում տրված է հաճախականության փոփոխությունների հաշվման մեթոդը, որը մինչև այժմ գոյություն ունեցող մեթոդներից տարրերով է նրանով, որ այն հաշվի է առնում սխեմիի դինամիկ հատկությունները:

Սխտեմի կարգավորման մի շարք պարամետրերի անալիտիկ որոշումը համարյա թե անհնար է: Առաջարկվում է կատարել հաճախականության վրա ազդող մի շարք պարամետրերի փորձնական որոշումը, որոնք անհրաժեշտ են սխտեմի հաճախականության փոփոխումը հաշվելու համար:

Բերված են նաև հաճախականության անկման հաշվային և փորձնական կորագծերը, որոնց համեմատությունը ցույց է տալիս, որ փորձնական և հաշվային կորագծերը բավականին մոտ են միմյանց: