

А. Б. Бабаханян

Графоаналитический метод определения динамики изменения частоты в электроэнергетических системах

Графоаналитическое решение изменения частоты в системе основывается на следующих уравнениях [3]:

для любых отклонений частоты

$$f_d = f_{\text{ном}} \sqrt{1 + \frac{\Delta P_b}{\mathfrak{E}_{js}} \cdot t}, \quad (1)$$

для малых отклонений частоты

$$f_d = f_{\text{ном}} \left(1 + \frac{\Delta P_b}{2\mathfrak{E}_{js}} \cdot t \right), \quad (2)$$

где ΔP_b — мощность возмущения, $\mathfrak{E}_{js}$ — кинетическая энергия вращения агрегатов системы, t — время, $f_{\text{ном}}$ — номинальное значение частоты, f_d — действительное значение частоты.

Рассмотрим вначале второе уравнение, как наиболее простое по структуре. Согласно уравнению (2) для одного и того же значения t отклонение частоты (Δf) будет пропорционально ΔP_b , так как,

$$\Delta f = f_{\text{ном}} - f_d = - \frac{\Delta P_b \cdot f_{\text{ном}}}{2\mathfrak{E}_{js}} t. \quad (3)$$

Учитывая это, можно подсчитать Δf для любого единичного значения ΔP_b и определенного значения t , и соответственно этому построить графически функцию $f = \varphi(\Delta P_b, t)$.

Далее, согласно (3), справедливо соотношение:

$$\frac{\Delta P_{b_1}}{\Delta P_{b_2}} = \frac{\Delta f_1}{\Delta f_2}. \quad (4)$$

По соотношению (4) соответственно определенным значениям ΔP_b и Δf можно строить для всех прочих значений ΔP_b функцию

$$f_d = \varphi(\Delta P_b, t).$$

При этом получим график с расходящимися лучами из начала координат по обе стороны оси абсцисс, т. е. для случаев изменения

(в обе стороны) частоты, от нормального уровня, совпадающего с осью времени.

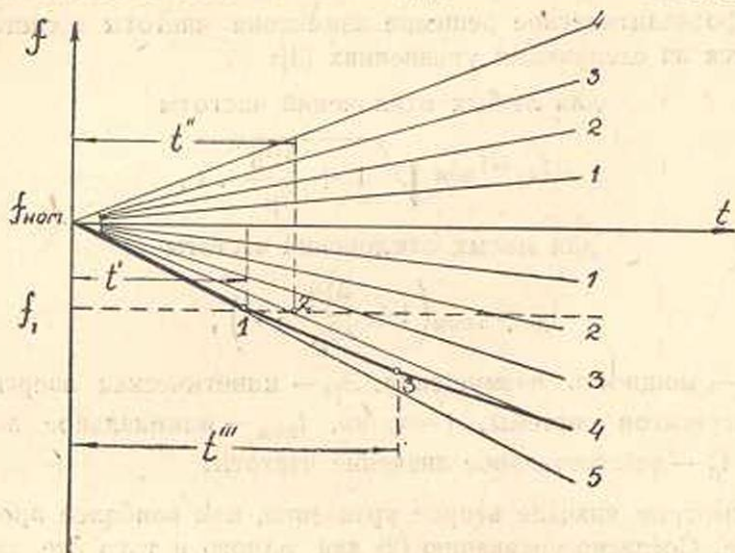
Если $\frac{\Delta P_{b_1}}{\Delta P_b}$ имеет кратность равную 2, 3, 4, 5 и т. д., то расхождение лучей будет равномерным, как показано на фиг. 1.

Примем вначале мощность возмущения равной ΔP_{b_1} .

Положим, что за время t' частота достигнет уровня f' , а ΔP_{b_1} изменится и станет равной ΔP_{b_2} (фиг. 1).

Докажем, что изменение частоты после точки 1 при $\Delta P_b = \text{const.}$ будет идти по прямой параллельной лучу 4.

Если частота с самого начала будет изменяться по лучу 4 соот-



Фиг. 1

ветственно ΔP_{b_2} , то она достигнет уровня f' за время t'' в точке 2.

Дальнейшее изменение частоты после точки 2 при $\Delta P_{b_2} = \text{const.}$ также будет идти по лучу 4, что соответствует уравнению

$$f_d = f_{\text{ном}} \left[K_{H''} - \frac{\Delta P_{b_2}}{2 \Theta_{js}} \cdot (t - t'') \right], \quad (5)$$

где

$$K_{H''} = \frac{f_1}{f_{\text{ном}}}.$$

Аналогично можно представить изменение частоты после точки 1

$$f_d = f_{\text{ном}} \left[K_{H'} - \frac{\Delta P_{b_1}}{2 \Theta_{js}} \cdot (t - t') \right]. \quad (6)$$

Уравнения (5) и (6) имеют равные угловые коэффициенты, поэтому изменение частоты после точки 1 будет идти по прямой параллельной лучу 4.

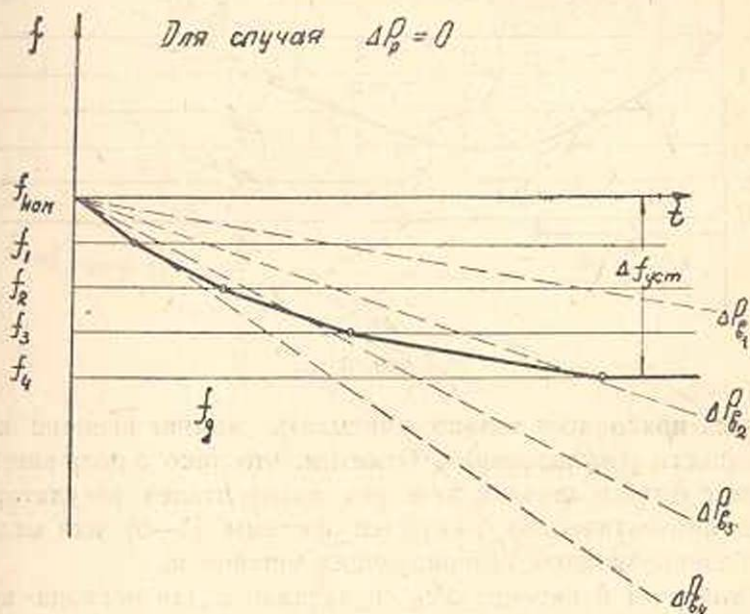
Таким же образом можно показать, что в случае, когда ΔP_{b_1} после точки 1 изменится и станет равным ΔP_{b_2} после времени t'' в точке 3, то частота будет изменяться после точки 3 по прямой параллельной лучу 3.

Принимая справедливость вышеуказанного можно без аналитического расчета изменения частоты для каждого момента строить графически динамику изменения частоты.

Само графическое построение производится в следующей последовательности. Сперва строится, как указано выше, график с лучами для различных значений мощности возмущения при условии $\Delta P_b = \text{const.}$ (фиг. 1). Далее принимается изменение частоты по определенному лучу соответственно первоначальному значению мощности возмущения. При этом считаем на малой ступени изменения частоты

$$\Delta P_b = \text{const.}$$

Для каждого малого изменения частоты, до истечения времени запаздывания действия регулирования (t_3) определяется изменение первоначального и последующих значений мощности возмущения



Фиг. 2

от действия ΔP_c^* . Из конца каждой ступени малого изменения частоты проводится прямая параллельная следующему лучу соответственно новому значению ΔP_b . Такое построение продолжают пока не получат установившегося уровня частоты.

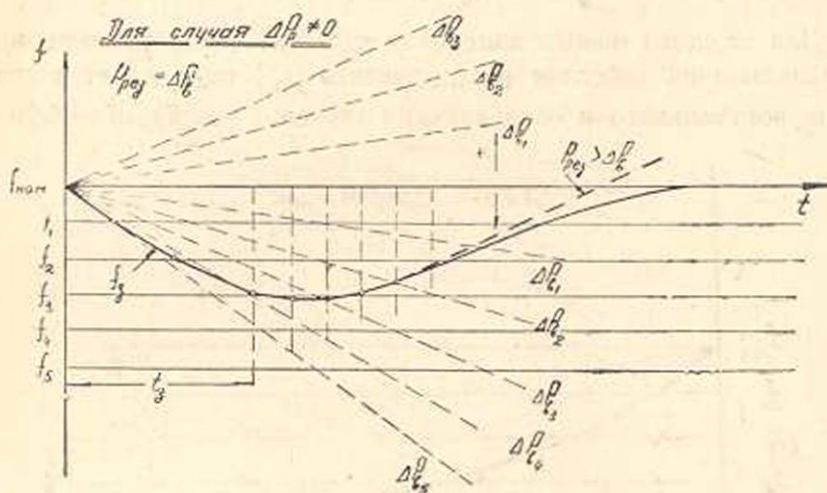
* ΔP_c — изменение мощности возмущения, связанное с изменением частоты

Такое же действие производится и при $t > t_3$, в случае, когда мощность регулирования (ΔP_p) равна нулю, т. е. когда в системе нет резерва вращающейся мощности, обеспеченного движущим фактором до и после момента возмущения (фиг. 2).

При наличии регулирования графическое построение после времени t_3 ведется с учетом изменения ΔP_b как для каждого малого изменения частоты от действия ΔP_c , так и для малого интервала времени от действия ΔP_p и соответственно значению $[\Delta P_b + (\Delta P_c + \Delta P_p)]$ производится переход от одного луча к другому.

Графическое построение для такого случая представлено на фиг. 3.

Если мощность регулирования вступает мгновенно и остается в дальнейшем постоянной, то учет изменения в малом интервале времени отпадает.



Фиг. 3

Здесь приходится только учитывать момент времени вступления мощности регулирования. Отметим, что такого рода регулирование может быть в случаях действия потребителей регуляторов частоты и автоматической разгрузки системы [1—5] или включения в сеть безинерционных генерирующих установок.

Такой учет изменения ΔP_b справедлив и для периода времени, когда мощность регулирования уже установлена. В вышеуказанных двух случаях учитывается только ΔP_c для каждого малого изменения частоты.

В электроэнергетической системе режимы работы куста и отдельных звеньев могут изменяться. В связи с этим может изменяться и значение кинетической энергии вращения агрегатов. Исходя из этого с целью графического построения изменения частоты надо было бы иметь для каждого такого режима отдельный график с лу-

чами, соответственно одному значению кинетической энергии вращения агрегатов системы.

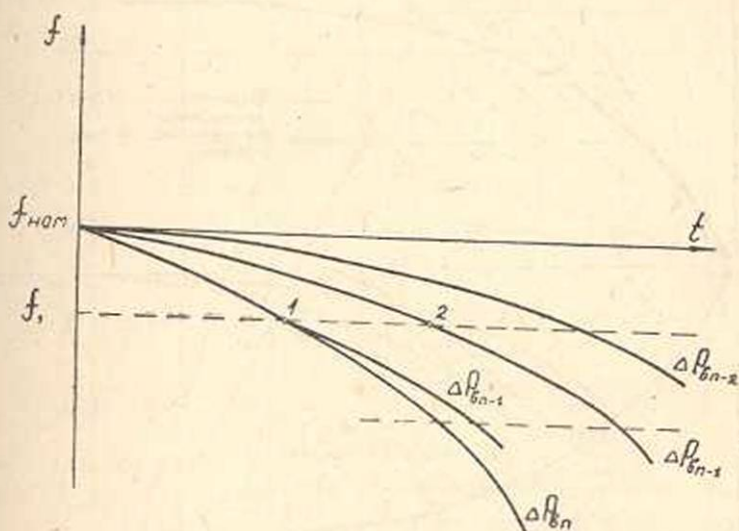
Можно иметь и другое решение. Если при изменениях значения $\mathcal{E}_{js}$ для различных режимов работы системы менять только масштаб времени на одном и том же графике с лучами, то тем самым можно использовать его для графического построения изменения частоты для всех режимов. Покажем справедливость такого решения, проанализировав уравнение (2). Здесь переменными величинами для построения лучей графика могут быть: ΔP_b , $\mathcal{E}_{js}$ и t . Если $\mathcal{E}_{js}$ изменится в m раз, то для использования того же графика надо, чтобы

отношение $\frac{\Delta P_b}{2 \mathcal{E}_{js}} \cdot t$ оставалось прежним, т. е. в этом случае надо

изменить масштаб ΔP_b или t в $\frac{1}{m}$ раз. С точки зрения простоты гра-

фического построения целесообразнее менять масштаб времени.

Таким образом весьма облегчается графическое построение динамики изменения частоты при различных режимах работы системы, т. к. в этом случае приходится иметь дело с одним стандартным графиком.



Фиг. 4

Весьма целесообразно иметь отпечатанные типографским способом бланки графиков с лучами изменения частоты для постоянных значений мощности возмущения.

Можно показать, что графическое построение также справедливо и для уравнения (1).

Представим график с расходящимися лучами, построенными по уравнению (1) (фиг. 4). Примем, что частота сначала изменяется соответственно какому-то значению $\Delta P_{bn} = \text{const}$.

Если после некоторого пониженного уровня частоты f' в точке I, мощность возмущения изменится и станет равной $\Delta P_{b_{n-1}}$, тогда уравнение (1) после этой точки I будет:

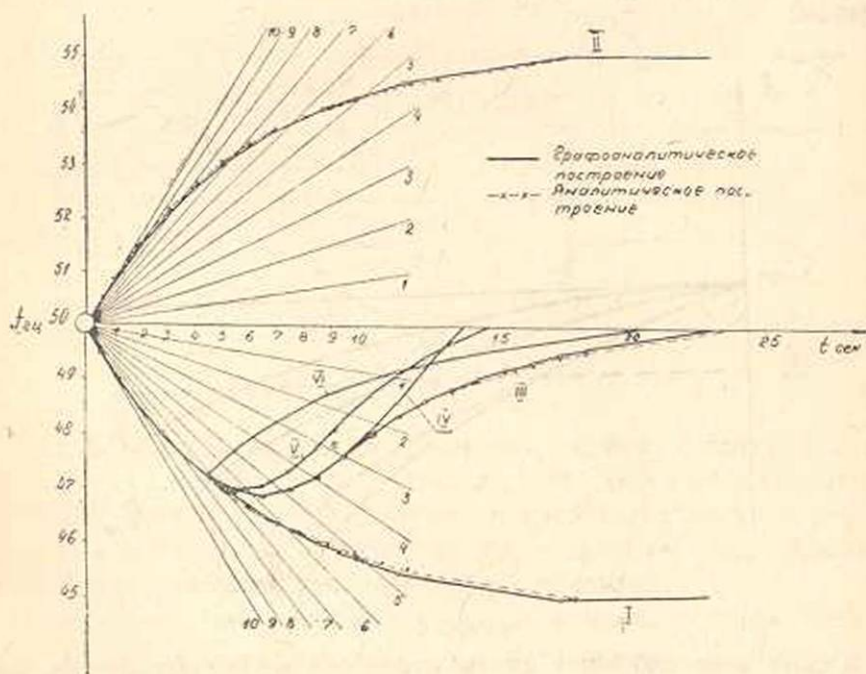
$$f_d = f_{\text{ном}} \sqrt{K_{f'} - \frac{\Delta P_{b_{n-1}}}{\mathfrak{E}_{js}} \cdot t}, \quad (7)$$

где

$$K_{f'} = \frac{f'}{f_{\text{ном}}}.$$

Это же уравнение будет справедливо для изменения частоты после точки 2 на уровне f' для мощности возмущения, действующей с самого начала и равной $\Delta P_{b_{n-1}}$.

Следовательно, графическое построение динамики изменения частоты также справедливо для уравнения (1). Здесь следует отметить, что при процессах с установлением и восстановлением частоты графическое построение значительно облегчится, т. к. само построение динамики изменения частоты будет производиться на относительно прямолинейной части лучей, и вообще в таких случаях для



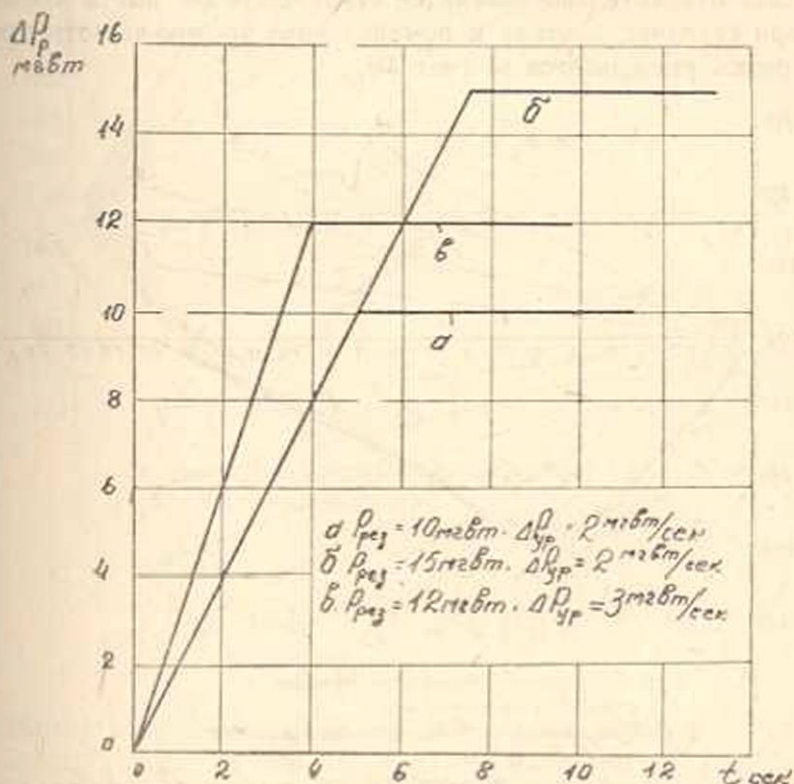
Фиг. 5

малого отрезка можно всегда привять участок криволинейного луча прямолинейным.

Для полноты картины графического построения на фиг. 5 представлена динамика изменения частоты при различных условиях ее возмущения и восстановления, полученная для примерной системы.

На фиг. 6 представлены графики мощности регулирования для расчетной системы, принятые прямолинейными для удобства построения.

Для сравнения аналитического и графического методов построения кривых изменения частоты нами представлены их результаты для трех условий по кривым I, II и III (фиг. 5). Сплошными линиями показано построение графическое, а пунктирными—аналитическое. Как видим, разница в результатах получается в пределах точности построения и расчета. Кривая I соответствует первоначальной мощности возмущения, равной 10 мвт при $\Delta P_c = 2$ мвт/герц для случая спада частоты при отсутствии регулирования. Кривая II представляет картину для случая подъема частоты при тех же условиях. Остальные кривые имеют следующие условия: первоначальное значение мощности возмущения равно 10 мвт. Время запаздывания действия регулирования принято равным 4,5 сек. Кривая III представляет динамику изменения частоты при мощности резерва, равной 10 мвт и удельной мощности регулирования, равной 2 мвт/сек. Кривая построена с учетом $\Delta P_c = 2$ мвт/герц.



Фиг. 6

Нетрудно заметить, что при спаде частоты роль ΔP_c положительна и заключается в установлении уровня частоты, тогда как

при подъеме частоты ΔP_c значительно затормаживает процесс ее восстановления.

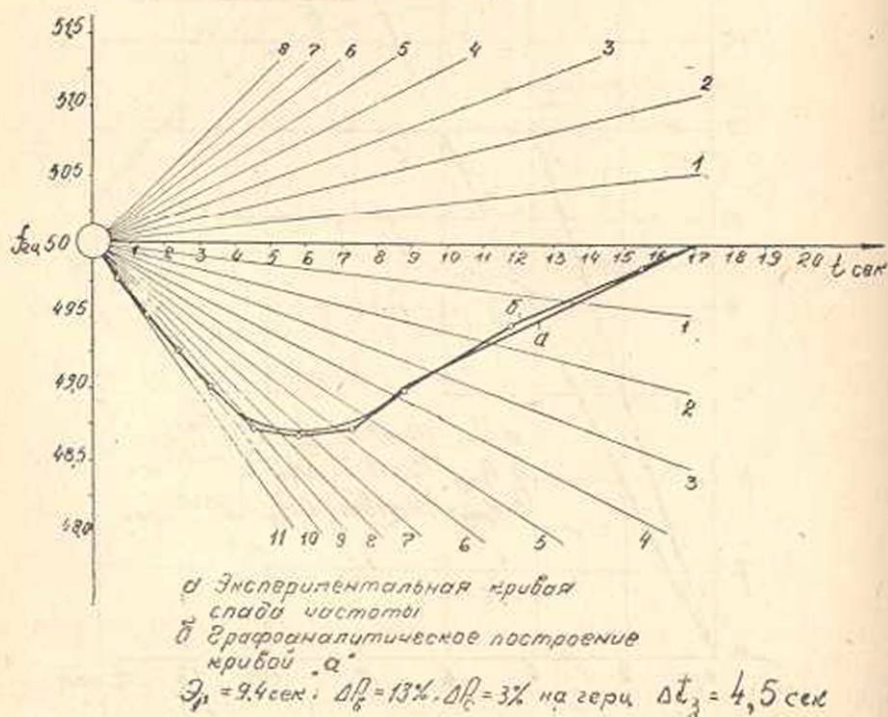
Кривая IV построена при тех же условиях, что и кривая III, но с той только разницей, что мощность резерва здесь взята равной 15 мвт. В силу этого кривая IV, расходясь с кривой III на десятой секунде от начала общего процесса изменения частоты, быстро поднимается и доходит до нормального уровня частоты уже ко времени 14 секунд.

Кривая V имеет следующие условия: мощность резерва взята равной 12 мвт, а удельная мощность — равной 3 мвт/сек.

Как и следовало ожидать, подъем частоты для указанного случая происходит значительно быстрее, в особенности, для относительно низких ступеней частоты, хотя общее время восстановления частоты для кривых V и IV почти одинаково.

Кривая VI представляет случай, когда при $t=t_3$ мгновенно отключается потребительская нагрузка мощностью в 10 мвт, при прочих равных условиях без наличия регулирования.

Безусловно, что самую большую скорость восстановления частоты для относительно низких ее ступеней будет иметь кривая VI, хотя при ступенях близких к номинальному уровню частоты эта скорость резко уменьшается за счет ΔP_c .



Фиг. 7

Можно однако регулировать время восстановления частоты значением мощности отключенного потребителя.

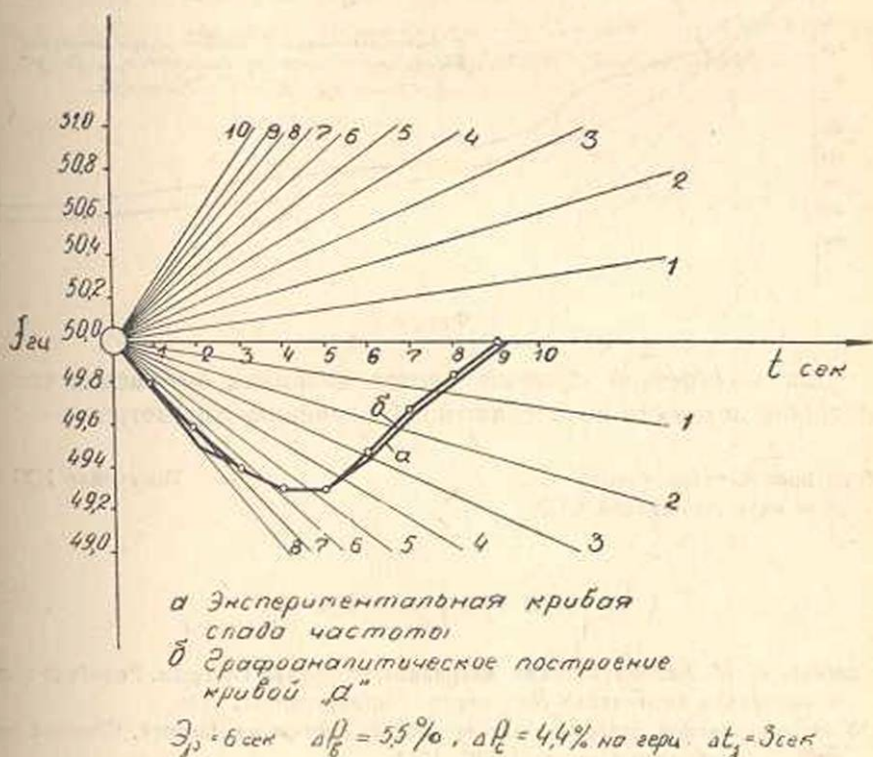
Представленные на фиг. 5 кривые дают возможность не только ознакомиться с результатами графического построения динамики изменения частоты, но и проливают свет на качество тех или иных условий регулирования.

Ниже, на фиг. 7, 8 и 9, приводятся экспериментальные кривые изменения частоты в двух системах и соответствующее графическое построение предлагаемым методом.

На фиг. 7 и 8 даны два случая изменения частоты с наличием мощности регулирования в одной и во второй системах.

На фиг. 9. представлен случай изменения частоты без наличия в системе мощности регулирования.

Как видно из вышеуказанных кривых экспериментальные кривые (обозначенные буквой „а“) практически почти совпадают с кривыми, построенными графическим способом (обозначенные буквой „б“).



Фиг. 8

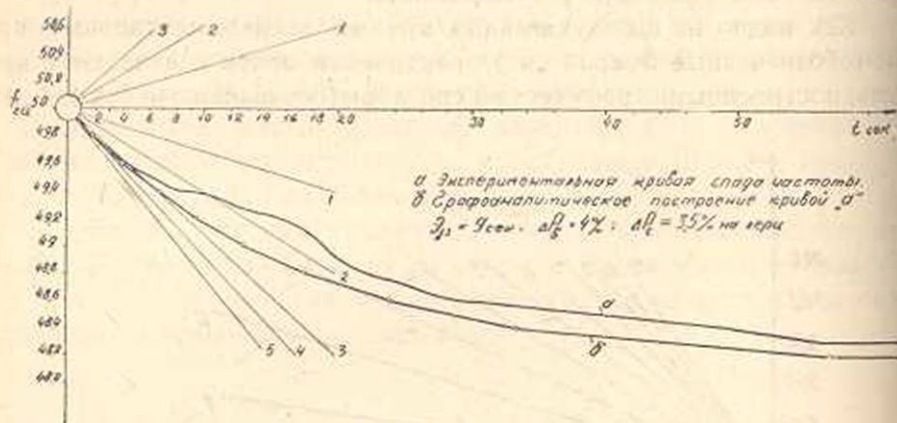
Незначительное расхождение экспериментальной и графически построенных кривых изменения частоты объясняется возможными посторонними возмущениями в системе, неучтенными в построении кривых. Это легко можно заметить по характеру изменения частоты. Так, например, на фиг. 9 экспериментальная кривая изменяется впадно, имея несколько незначительных изгибов, повидимому из-за колебания нагрузки системы в период проведения экспериментов.

Обычно, чем больше мощность возмущения при экспериментах, тем более незначительным получается расхождение кривых изменения частоты эксперимента и графического построения.

На фиг. 7, 8 и 9 значение кинетической энергии вращения агрегатов системы $\mathcal{E}_s$ и мощности регулирования (P_p) даны относительно вращающейся мощности системы.

Значение изменения мощности системы по частоте (ΔP_c) дано относительно нагрузки системы.

Лучи графика построены соответственно принятым единицам.



Фиг. 9

Для конкретной системы расчет динамики изменения частоты целесообразно вести по абсолютному значению параметров.

Лаборатория электротехники
Академии наук Армянской ССР

Поступило 1 XI 1951

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Соловьев И. И. Автоматическая аварийная разгрузка системы. Релейная защита и системная автоматика Мосэнерго. Госэнергоиздат, 1946.
2. Об автоматической разгрузке электрических систем по частоте. Сборник решений Технического Отдела НКЭС, 1944.
3. Бабаханян А. Б. Метод расчета изменения частоты в электроэнергетических системах. ДАН Армянской ССР, X, № 5, 1949.
4. Бабаханян А. Б. Потребители-регуляторы частоты (ПРЧ) в электроэнергетической системе. ДАН Армянской ССР, IX, № 4, 1948.
5. Бабаханян А. Б. К вопросу об автоматической разгрузке электроэнергетических систем. ДАН Армянской ССР, X, № 3, 1949.

Հ. Բ. Բարախանյան

ԷՆԵՐԳԵՏԻԿ ՍԻՍՏԵՄՆԵՐՈՒՄ ՀԱՃԱԽԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՓՈՓՈԽՈՒԹՅԱՆ
ԴԻՆԱՄԻԿԱՆ ՈՐՈՇԵԼՈՒ ԳՐԱՖՈԱՆԱԼԻՏԻԿ ՄԵԹՈԴ

Ա Մ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Հաղվածում արվում է էլեկտրոէներգետիկ սիստեմներում հաճախականության փոփոխության դինամիկայի որոշման գրաֆոտանալիտիկ մեթոդի բերվում է նրա բաղդատումը հեղինակի տված՝ հաճախականության փոփոխության դինամիկայի անալիտիկ մեթոդի և երկու հիգրոէլեկտրական սիստեմներում ստացված էքսպերիմենտալ տվյալներին հետ:

Ինչպես ցույց են տալիս վերոհիշյալ բաղդատման արդյունքները, գրաֆոտանալիտիկ մեթոդը, լինելով զդալիորեն պարզ և գյուրին, տալիս է միանգամայն բավարար արդյունքներ և կարող է հաջողությամբ կիրառվել էլեկտրական սիստեմներում ինժեներական հաշվումներ կատարելիս:

Հաղվածում համառոտ կերպով պարզաբանվում է հաճախականության փոփոխությունը սիստեմի կարգավորման զանազան պայմանների դեպքում և արվում է կարգավորման աարբեր ձևերի գնահատականը: