

УДК 621.311

СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ  
ЭНЕРГОСИСТЕМЫ ПО ЧАСТОТЕ  
FREQUENCY STATIC CHARACTERISTICS OF THE POWER SYSTEM

П.Г. Балаш, А.М. Наумец, Е.В. Оболевич

Научный руководитель – А.А. Волков, старший преподаватель  
Белорусский национальный технический университет, г. Минск

P. Balash, A. Naumets, E. Obolevich

Supervisor – A. Volkau, Senior Lecturer

Belarusian national technical university, Minsk

**Аннотация:** рассмотрены причины и последствия отклонения частоты энергосистемы от номинальной, различные типы потребителей по зависимости их мощности от частоты, необходимость учёта статических характеристик, лавина частоты.

**Abstract:** the causes and consequences of the deviation of the frequency of the power system from the nominal, various types of consumers according to the dependence of their power on frequency, the need to take into account static characteristics, and the frequency avalanche are considered.

**Ключевые слова:** статическая устойчивость, анализ системы, статические характеристики, не баланс мощностей.

**Keywords:** static stability, system analysis, static characteristics, power unbalance.

### Введение

Номинальная частота сети, наряду с номинальным напряжением, является одним из основных показателей качества электроэнергии, поэтому допустимые отклонения частоты регламентируются. Допускается кратковременная работа энергосистем с эксплуатационным отклонением частоты в нормативных пределах качества электроэнергии 0,2 Гц. Предельно допустимые отклонения частоты от номинального значения составляют 0,4 Гц.

Статические характеристики нагрузки энергосистемы по частоте являются важным параметром для эффективной работы энергосистемы. Эти характеристики позволяют определить поведение нагрузки при изменении частоты в системе.

### Основная часть

Характеристикой каждого электроприемника и потребителей в целом является потребляемая ими активная и реактивная мощность. Величина мощности потребителей зависит как от режима их работы во времени, так и от параметров режима – напряжения на зажимах электропотребителя и частоты в электрической сети.

Зависимости, показывающие изменение активной и реактивной мощности от частоты  $f$  и подведенного напряжения  $U$  при медленных изменениях (менее 1%/сек) этих параметров, называют статическими характеристиками нагрузки (СХН). Последние наиболее полно учитывают действительные изменения электрических нагрузок от частоты и напряжения и в этом отношении являются

наиболее точным способом представления электрических нагрузок в задачах расчета и анализа установившихся режимов электрических сетей и систем снабжения.

Основной для определения и изучения статических характеристик являются эксперименты, в которых изменяются условия электропитания нагрузок (варьируются частота и напряжение) и отмечаются соответствующие изменения мощности. Измерение мощностей  $P$  и  $Q$  выполняют сразу же после изменения условий электропитания и окончания переходного процесса. Полученные при этом СХН называются естественными, так как они отражают свойственную нагрузкам реакцию на отключения напряжения и частоты. Для отдельных электропотребителей естественные совместные зависимости нагрузок от частоты и напряжения рассматриваются отдельно в виде зависимости активной и реактивной мощностей от частоты и напряжения. Учет последних СХН выполняется при постоянстве частоты.

При расчете и анализе режимов работы электрических сетей и систем электроснабжения учет их нагрузок выполняют не отдельными электропотребителями, а обобщенными потребителями узлов схемы сети, учитывающих отдельных электропотребителей в их совокупности для отдельного цеха, предприятия, городского или сельского района и т.п. Вид этих зависимостей определяется составом электропотребителей. При этом существенно, что областью определения СХН являются режимы не с любыми значениями напряжений, а только с такими  $U$  больше критического  $U_{кр}$ , при которых не нарушается устойчивость двигателей и других электроустановок.

В состав узлов нагрузки входят разные потребители (таблица 1). Для разных категорий потребителей характер зависимости мощности от частоты различается.

У потребителей нулевого типа мощность не зависит от частоты. К таким потребителям относятся электроосветительные лампы накаливания, электронагревательные приборы, печи сопротивления, бытовая техника, электронные устройства.

У электродвигателей, приводящих в движение поршневые насосы, компрессоры, шаровые мельницы, дробилки, металлорежущие станки, подъемные и транспортные механизмы, потребляемые мощность примерно пропорциональна частоте. Указанных потребителей принято относить к потребителям первого типа.

К потребителям второго типа относятся потребители, мощность которых примерно пропорциональна частоте во второй степени. В частности, такую зависимость имеют потери активной мощности (при постоянном напряжении) в электрических сетях.

Потребителями третьего типа, мощность которых примерно пропорциональна частоте в третьей степени, могут считаться центробежные электронасосы и вентиляторы, работающие с малым статическим напором. Эти же установки, работающие с большим статическим напором, относятся к потребителям четвертого типа.

В общем случае пользуются так называемыми типовыми обобщенными СХН (рисунок 1) для характерного и отечественных электроэнергетических системах нагрузок.

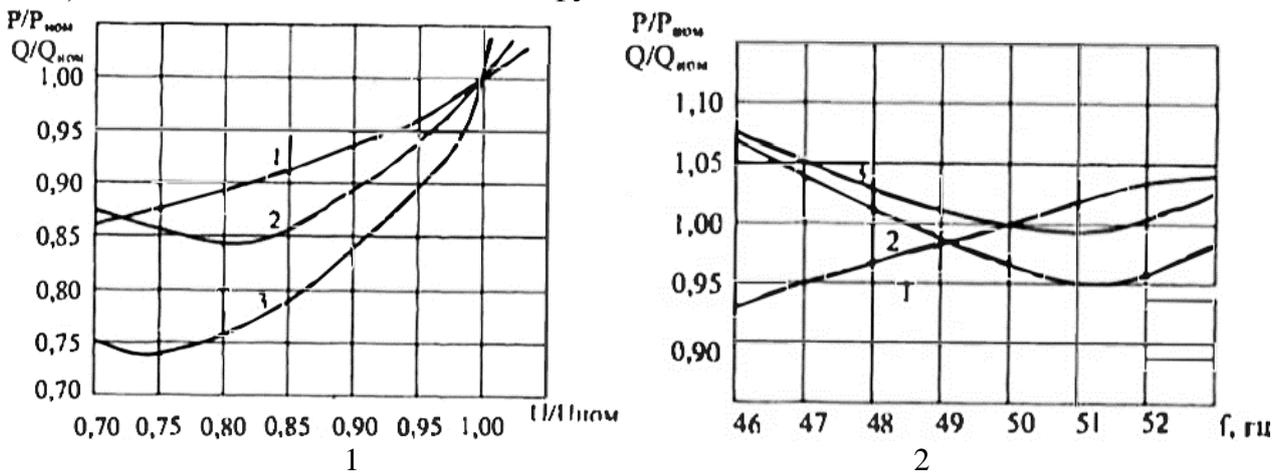
$$P_H = P_{H.НОМ} \left( a_0 + a_1 \frac{f}{f_{НОМ}} + a_2 \frac{f^2}{f_{НОМ}^2} + \dots + a_m \frac{f^m}{f_{НОМ}^m} \right), \quad (1)$$

где  $P_{H.НОМ}$  – суммарная мощность нагрузки при номинальной частоте;  
 $a$  – коэффициенты долевого участия потребителя разных типов.

Таблица 1 – Примерный состав нагрузки в процентах

Примерный состав нагрузки, соответствующий типовым СХН	%
Асинхронные двигатели	50
Освещение и бытовые потребители	22
Электрические печи	11
Синхронные двигатели	9
Потери в сетях	8

Как видно из рисунка 1, потребляемая из сети активная мощность (при указанной структуре нагрузки) с увеличением частоты и напряжения возрастает почти прямолинейно. Измерение же потребления реактивной мощности (кривые 2 и 3) описывается более сложной функцией.



1 – P/Pном при 6-110 кВ, 2 – Q/Qном при 110 кВ, 3 – Q/Qном при 6 кВ

Рисунок 1 – Статические характеристики нагрузок по напряжению и частоте

Статические характеристики нагрузок позволяют определить регулирующий эффект электрической нагрузки, под которым понимается степень изменения нагрузки при единичном изменении напряжения и частоты. Величину изменения нагрузок можно определить, разложив функции зависимости изменения мощностей от напряжения или частоты в ряд Тейлора, относительно начальных значений напряжения  $U_0$  и частоты  $f_0$ . В качестве последних можно принять их номинальные значения. Если частота в ЭЭС и напряжение в узле нагрузки изменяется в сравнительно небольших пределах:  $\Delta U = U - U_0$ ,  $\Delta f = f - f_0$ , например, допустимых стандартов на качество электроэнергии, то, ограничиваясь линейным отрезком ряда Тейлора в малых окрестностях переменных  $\Delta U$ ,  $\Delta f$ , получаем:

$$P(U, f) = P(U_0, f_0) + \frac{\partial P}{\partial f} \Delta f + \frac{\partial P}{\partial U} \Delta U, \quad (2)$$

$$Q(U, f) = Q(U_0, f_0) + \frac{\partial Q}{\partial f} \Delta f + \frac{\partial Q}{\partial U} \Delta U. \quad (3)$$

Тогда искомые изменения нагрузок можно оценить в виде:

$$\delta P = P - P_0 = \alpha_f \Delta f + \alpha_U \Delta U, \quad (4)$$

$$\delta Q = Q - Q_0 = \beta_f \Delta f + \beta_U \Delta U, \quad (5)$$

где  $\alpha_f$ ,  $\alpha_U$ ,  $\beta_f$ ,  $\beta_U$  – значения производных, характеризующих регулирующий эффект нагрузки по частоте и напряжению, количественно определяющий изменение нагрузки при единичном изменении частоты и напряжения.

Статические характеристики по частоте должны учитываться при расчетах послеаварийных установившихся режимов, в которых имеет место дефицит активной мощности (например, при отключении отдельных крупных агрегатов на электростанциях) и частота сильно отличается от номинальной. Такие расчеты установившихся режимов учитывают изменения частоты и применяются для управления устройствами регулирования частоты и противоаварийной автоматики.

Коэффициент регулирующего эффекта активной нагрузки по частоте, равной относительному изменению потребляемой мощности при изменении частоты на одну относительную единицу может быть определен через производную мощности нагрузки по частоте:

$$k_H = \frac{\frac{\Delta P_H}{P_{H,НОМ}}}{\frac{\Delta f}{f_{НОМ}}} = \frac{f_{НОМ}}{P_{H,НОМ}} \frac{dP}{df} = a_1 + 2a_2 \frac{f}{f_{НОМ}} + \dots + ma_m \frac{f^{m-1}}{f_{НОМ}^{m-1}}. \quad (6)$$

При малых отклонениях частоты можно считать  $f$  приблизительно равно  $f_{НОМ}$ , тогда:

$$k_H = a_1 + 2a_2 + \dots + ma_m. \quad (7)$$

В течении суток состав потребителей энергосистемы меняется: днем осветительная нагрузка в основном отсутствует, а преобладает нагрузка промышленных предприятий, в вечерние часы промышленная нагрузка несколько снижается, а осветительная увеличивается. С изменением состава потребителей изменяется и регулирующий эффект нагрузки. Обычно эти изменения не очень велики. Установлено, что изменение регулирующего эффекта нагрузки в течение суток не выходит за пределы (10-15)%.

Для разных энергосистем с характерным для них составом потребителей регулирующий эффект нагрузки различен. Для энергосистем России этот коэффициент равен 1-3. Это значит, что при снижении частоты в энергосистемах на 1,0% (0,5 Гц), потребление уменьшается на 1-3%.

Нормальный установившийся режим характеризуется соблюдением баланса активной мощности, когда мощность, генерируемая электростанции, равна потребляемой мощности:

$$P_{Г} = P_{П}, \tag{8}$$

где  $P_{Г}$  – мощность генерирующих источников;

$P_{П}$  – мощность электроприемников, включая потери в элементах энергосистемы.

На рисунке 2 приведены статические характеристики генерации (кривая  $P_{Г0}$ ) и нагрузки (кривая  $P_{П}$ ). Частота электрической сети определяется точкой  $O$  пересечения статических характеристик, её установившееся значения характеризуется значением  $f_0$ .

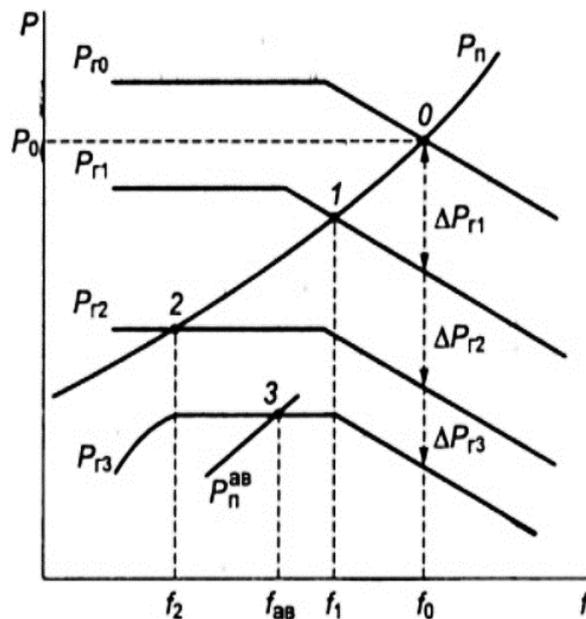


Рисунок 2 – Зависимость мощности генерации и нагрузки от частоты

Процесс изменения частоты в ЭЭС, вызванный нарушением баланса между генерируемой и потребляемой мощностью, определяется частотными свойствами как генерирующей, так и потребляющей части. Поэтому для учета свойств обеих частей используют результирующую статическую характеристику. Под этой характеристикой понимают зависимость отклонение частоты (в установившемся режиме) от внезапно возникшего по какой-либо причине первичного и баланса мощности  $\Delta P$ , обусловившего это отклонение. Коэффициент статизма (крутизны) это характеристики определяется в соответствии с выражением:

$$k_{с.р} = \frac{\frac{\Delta f}{f_{НОМ}}}{\frac{\Delta P}{P_{Н.НОМ}}} = \frac{1}{\frac{\rho}{k_{с.г}} + k_H}, \tag{9}$$

или

$$S_p = \frac{\frac{\Delta P}{P_{H,НОМ}}}{\frac{\Delta f}{f_{НОМ}}} = \frac{\rho}{k_{c,г}} + k_H = \rho S_\Gamma + k_H, \quad (10)$$

где  $\rho = \frac{P_{г,НОМ}}{P_{НО}}$  – коэффициент резерва;

$k_{c,г}$  – эквивалентный коэффициент статизма генерирующей части;

$S_\Gamma = \frac{1}{k_{c,г}}$  – коэффициент крутизны;

$P_{г,НОМ}$  – суммарная номинальная мощность всех работающих агрегатов;

$P_{НО}$  – мощность нагрузки.

На уменьшение  $k_{c,п}$ , определяющего стабильность частоты в ЭЭС, в первую очередь влияют следующие факторы:

- увеличение резерва мощности;
- уменьшение коэффициента статизма частотной характеристики генерирующей части  $k_{c,г}$ ;
- увеличение значения коэффициента регулирующего эффекта нагрузки  $k_H$ .

Значительное снижение частоты может вызвать крупную аварию – лавину частоты – вплоть до полного погашения электростанций и электроприемников. Восстановление работы электростанции требует подачи на каждую из них электроэнергии от непогашенной части энергосистемы, что является при большом числе полностью остановившихся электростанция весьма трудоёмкой задачей и занимает, как правило, несколько часов.

Лавина частоты возникает при условиях, когда полностью исчерпаны мощности электростанций. Поэтому единственная возможность удержать частоту на допустимом уровне – это снижение мощности потребителей электроэнергии.

При возникновении аварийного избытка генерирующей мощности частота в энергосистеме повышается. При этом повышение частоты в системе приносит не меньше неприятностей, чем её понижение. Наибольшую опасность аварийное увеличение частоты представляет для лопаточных аппаратов паровых турбин ТЭС. Скорость и степень повышения частоты определяются действиями регуляторов турбин. В отделившейся энергосистеме или энергорайоне с избытком активной мощности может происходить весьма быстрое и значительное повышение частоты. Это вызвано медленным действием автоматической разгрузки станции.

### **Заключение**

Статические характеристики нагрузки энергосистемы по частоте являются важным параметром для оценки режимов работы энергосистемы. Они позволяют определить изменение нагрузки в режимах при изменении частоты, а так же определить управляющие воздействия для ввода режима в допустимую область и предотвращения развития лавины частоты.

### Литература

1. Герасименко А.А., Федин В.Т. Передача и распределение электрической энергии – Ростов-на-Дону: Феникс, 2008. – 715 с.
2. Данильчук, В. Н. Автоматика ограничения изменений частоты энергосистем. Практическое пособие для инженеров по обслуживанию частотных автоматов, блокировок и защит. / В. Н. Данильчук. — Киев: Объединенная энергосистема Украины (ОЭС Украины), 2014. — 440 с.
3. Калентионок Е. В., Прокопенко В. Г., Федин В. Т. Оперативное управление в энергосистеме – Минск, 2007. – 351с.
4. Рабинович Р. С. Автоматическая частотная разгрузка энергосистем / Рабинович Р. С. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 352 с.