

**В.И. Самулев, Т.Н. Гусакова, В.П. Епифанов**  
ФГБОУ ВО «ВГУВТ»

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ РАСЧЕТА МОЩНОСТИ СУДОВОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Рассматриваются вероятностный и табличный методы определения мощности судовой электростанции и произведен анализ точности по данным теплохода проекта 92-016

### **I. Вероятностный метод определения мощности электростанции**

Применение вероятностных методов позволяет определить вероятностные характеристики суммарной потребляемой мощности, такие, как ее математическое ожидание и дисперсия, а также суммарную мощность ЭС, необходимую для обеспечения всех потребителей электроэнергии с заданной вероятностью. Наиболее полно эта задача может быть решена методом статистических испытаний, который нашел практическое применение с появлением вычислительных машин, так как требует выполнения сравнительно большого числа расчетов. Метод статистических испытаний позволяет получить искомые результаты не в виде аналитических выражений, а в виде их числовых значений. Для этого составляют вероятностную модель задачи, которая реализуется случайным образом.

Далее производят обработку результатов эксперимента и определяют статистические значения требуемых вероятностных характеристик, которые при достаточно большом числе реализаций сравнительно мало отличаются от истинных значений этих характеристик.

Пользуясь этим методом, можно, не вводя каких-либо существенных допущений, определить с помощью ЭВМ мощность электростанции. Необходимо помнить, что статистическое моделирование достаточно сложных судовых электроэнергетических систем требует больших затрат машинного времени. Кроме того, при значениях вероятности, близких к единице, сходимость расчетов существенно ухудшается, что также ведет к увеличению необходимого числа испытаний. В то же время именно эти значения вероятности представляют наибольший практический интерес. Поэтому наряду с методом статистических испытаний целесообразно использовать способы определения мощности ЭС, основанные на методах числовых характеристик и массового обслуживания. Последний рекомендуется применять в их случаях, когда число потребителей сравнительно невелико, а их нагрузка в основном изменяется ступенчато. Метод числовых характеристик используется при большом числе потребителей, причем характер нагрузки не накладывает никаких ограничений.

Метод числовых характеристик. Как известно, случайная функция в результате опыта может принимать тот или иной конкретный вид, который называют реализацией случайной функции. В данном случае такими реализациями будут графики нагрузок.

При фиксированных значениях аргумента  $t$  случайная функция превращается в случайную величину, представляющую собой значения потребляемой мощности в данный момент времени. Случайная величина в теории вероятностей считается заданной, если известны ее функции распределения.

Если заменить случайный процесс потребления совокупностью  $n$  случайных значений потребляемой мощности, соответствующих моментам времени  $t_1, t_2, \dots, t_n$ , то указанный процесс может быть описан с помощью  $n$ -мерной функции распределения. Однако получить аналитические выражения многомерных функции распределения при большом числе  $n$  оказывается практически невозможным. Поэтому при анализе графиков нагрузки целесообразно пользоваться характеристиками случайных функций, применение которых при определенных допущениях позволяет существенно сократить процесс вычислений.

Рассмотрим семейство кривых, определяющих характер случайных значений мощности  $P(t)$  некоторого условного потребителя (рис. 1), которое представляет собой четыре наложенных друг на друга нагрузки этого потребителя. Определим основные характеристики такого семейства реализаций, к которым относятся понятия математическое ожидание и дисперсия. Тогда для нашего случая, если рассмотреть значения случайных функций (графики нагрузки), соответствующие моменту времени  $t$ , математическое ожидание мощности в этот момент будет определяться выражением

$$M_P(t) = M[P(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} P(t) f(P, t) dP$$

где  $f(P, t)$  – плотность распределения мощности в момент времени  $t$ .

Таким образом, математическое ожидание мощности  $M_P(t)$ , представленное жирной линией на рис. 1, при каждом значении аргумента  $t$  равно математическому ожиданию мощности при данном значении аргумента. Математическое ожидание представляет собой среднюю функцию, вокруг которой группируются все данные реализации потребляемой мощности.

Определим теперь понятие дисперсии потребляемой мощности, которое описывается выражением

$$D_P(t) = D[P(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} [P(t) - M_P(t)]^2 f(P, t) dP$$

Дисперсия потребляемой мощности характеризует разброс различных графиков нагрузки относительно среднего.

Математическое ожидание и дисперсия потребляемой мощности являются наиболее важными, но не единственными характеристиками процесса потребления. Для учета специфических особенностей процесса вводится также понятие корреляционной функции.

Так, *корреляционная функция* потребляемой мощности характеризует степень зависимости между значениями мощности  $P_1$  и  $P_2$  графиков нагрузки, соответствующими различным моментам времени  $t_1$  и  $t_2$ .

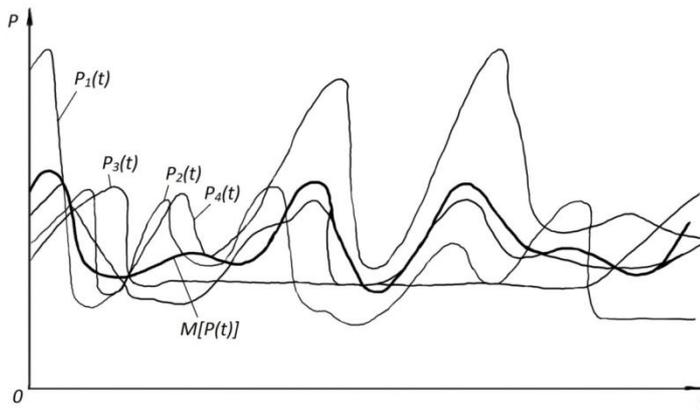


Рис. 1. Семейство кривых мощности  $P(t)$

Корреляционной функцией потребляемой мощности  $P(t)$  будем называть корреляционный момент значений  $P(t_1)$  и  $P(t_2)$ .

$$Mp(t_2)] f(P_1, P_2) dP_1 P_2 \quad (1)$$

Подобным же образом вводится понятие взаимно-корреляционной функции, характеризующей связь между мощностями, потребляемыми  $i$ -м и  $j$ -м потребителями. По аналогии с (1) имеем

$$\begin{aligned} Kp_{ij}(t_1, t_2) &= M\{[P_i - Mp_i(t_1)][P_j - Mp_j(t_2)]\} \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} [P_i - Mp_i(t_1)][P_j - Mp_j(t_2)] f(p_i, p_j, t_1, t_2) dt_1 dt_2 \end{aligned}$$

В ряде случаев представляет интерес корреляционная функция между мощностями  $i$ -го и  $j$ -го потребителей в момент времени  $t$ , т. е. когда  $t=t_1 = t_2$ :

$$\begin{aligned} Kp_{ij}(t) &= M\{[P_i - Mp_i(t)][P_j - Mp_j(t)]\} \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} [P_i - Mp_i(t)][P_j - Mp_j(t)] f(p_i, p_j, t) dt dt \end{aligned}$$

Математическое описание процесса потребления в самом общем случае без каких-либо допущений связано с большими трудностями. Поэтому при анализе графиков нагрузки обычно делают допущение о стационарности процесса потребления, при котором математическое ожидание и дисперсия являются постоянными величинами:

$$Mp(t) = Mp = \text{const}$$

$$Dp(t) = Dp = \text{const}$$

Это, в частности, означает, что процесс в целом не имеет тенденции ни к затуханию, ни к нарастанию, ни к каким-либо регулярным периодическим явлениям. Все случайные процессы и соответствующие им функции, не обладающие свойством инвариантности статистических характеристик к временным сдвигам, определяются как нестационарные.

При рассмотрении стационарных случайных процессов во многих случаях определение функции распределения вероятности' упрощается в том отношении, что все они могут быть найдены из результатов наблюдения в течение достаточно долгого промежутка времени над одной единственной реализацией, а не над многими. Это положение базируется на так называемой эргодической гипотезе, согласно которой большое число наблюдений над одной (единственной) реализацией, график нагрузки которой представляет собой стационарный случайный процесс, в произвольно выбранные моменты времени имеет те же статистические свойства, что и то же число наблюдений над произвольно выбранными подобными реализациями в один и тот же момент времени.

Корреляционная функция стационарного случайного процесса зависит не от положения первого аргумента  $t_1$  на оси времени, а от разности между первым и вторым аргументами:  $\tau = t_1 - t_2$ ,

$$\text{тогда } Kp(t_1, t_2 + \tau) = Kp(\tau),$$

т.е. корреляционная функция стационарного случайного процесса – это функция не двух аргументов  $t_1$  и  $t_2$ , а только одного аргумента  $\tau$ .

Как было сказано выше, большинство потребителей работает эпизодически, в зависимости от режима судна, времени суток и др. Поэтому на протяжении всего рейса или даже одних суток процесс потребления электроэнергии нельзя считать стационарным. Методы исследования стационарных случайных процессов применимы и в тех случаях, когда нестационарные процессы на определенных участках времени и с известным приближением могут быть приняты за стационарные.

Пользуясь графиками нагрузок, можно определить числовые характеристики процессов потребления мощности исследуемого потребителя на каждом из стационарных режимов его работы. Затем, зная среднее время работы этого потребителя, в том или ином режиме, можно вычислить статистические характеристики процесса потребления за какой-либо интервал времени (сутки, рейс, год), а далее на основе теорем теории вероятности о числовых характеристиках случайных величин определить статистические характеристики суммарной потребляемой мощности, с помощью которой находится и мощность судовой электростанции.

При определении числовых характеристик потребления на стационарных участках, а именно математического ожидания и дисперсии потребляемой мощности обычно делают допущения об эргодичности процесса потребления на рассматриваемом участке. В этом случае один график нагрузки в достаточно большом интервале времени  $\tau$  позволяет получить числовые характеристики случайного процесса.

Таким образом, осредняя значения потребляемой мощности вдоль оси времени, мы получаем приближенное значение математического ожидания, а осредняя квадраты отклонения от этого среднего, получаем приближенное значение дисперсии потребляемой мощности.

Соответственно значения статистических числовых характеристик  $i$ -го потребителя на  $k$ -м. участке принимают вид:

$$M^*[P_{ik}] = \frac{1}{\tau} \int_{t_0}^{t_0+\tau} P_{ik}(t) dt; \quad (2)$$

$$D^*[P_{ik}] = \frac{1}{\tau} \int_{t_0}^{t_0+\tau} [P_{ik}(t) - M(P_{ik})]^2 dt. \quad (3)$$

Определяем указанные числовые характеристики  $i$ -го потребителя с помощью графика нагрузки. Для этого разделим ось времени графика на  $N$  весьма малых интервалов  $\Delta t = T/N$ . Придадим временному аргументу  $t$  дискретные значения, кратные  $\Delta t$ , т. е. возьмем  $t = t_0 + \Delta t(r-1)$  тогда интеграл (2) при вычислении статистического математического ожидания можно заменить следующей суммой:

$$M^*[P_{ik}] = \frac{1}{N} \sum_{r=1}^N P_{ik}$$

соответственно выражение для статистической дисперсии примет вид

$$D^*[P_{ik}] = \frac{1}{N-1} \sum_{r=1}^N [P_{ik}(t_r) - M(P_{ik})]^2 =$$

$$\left\{ \frac{1}{N} [P_{ik}(t_r)]^2 - [M(P_{ik})]^2 \right\} \frac{N}{N-1}$$

Затем определяем математическое ожидание и дисперсию потребляемой мощности в интервале времени  $T$ , состоящем из  $m$  стационарных участков. Пусть  $i$ -й потребитель на  $k$ -м стационарном участке работает  $t_{ik}$  мин. Тогда выражения для числовых характеристик примут вид:

$$M[P_i] = \frac{1}{T} \sum_{k=1}^m M[P_{ik}] t_{ik}; \quad (4)$$

$$D[P_i] = \frac{1}{T} \sum_{k=1}^m \{ D(P_{ik}) + [M(P_{ik}) - M(P_i)]^2 \} t_{ik}. \quad (5)$$

Если потребитель на стационарных участках работает с постоянной нагрузкой, т.е.  $M[P_{ik}] = P_{ik}$ , а  $D[P_{ik}] = 0$ , то выражение для дисперсии  $D_i[P_i]$  существенно упрощается:

$$D[P_i] = \frac{1}{T} \sum_{k=1}^m \{ P_{ik} - M[P_i] \}^2 t_{ik}.$$

При определении дисперсии потребляемой мощности в общем случае необходимо учитывать корреляцию между различными потребителями.

Для эргодического стационарного процесса будем иметь

$$K_{ij}^*[P] = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} [P_i(t) - M(P_i)][P_j(t) - M(P_j)] dt$$

Или перейдя к сумме,

$$K_{ij}^*[P] = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [P_i(t) - M^*(P_i)][P_j(t) - M^*(P_j)]$$

тогда выражение для дисперсии можно записать следующим образом:

$$D[P] = \sum_{i=1}^m D[P_i] + 2 \sum_{i=2}^m \sum_{j=1}^{i-1} K_{ij}(F).$$

Если же корреляция между отдельными потребителями отсутствует или пренебрежимо мала, то выражение для дисперсии примет вид

$$D[P] = \sum_{i=1}^m D[P_i].$$

При большом числе потребителей можно допустить, что суммарная потребляемая мощность в определенном режиме судна в любой фиксированный момент времени подчиняется нормальному закону распределения. При этом условии вероятность обеспечения потребителей электроэнергией может быть определена с помощью выражения

$$\rho = 0,5 + \varphi_0(z) \quad (6)$$

где  $\varphi_0(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z e^{-\frac{z^2}{2}} dz$  – интеграл Лапласа-Гаусса, значения которого при различных  $z$  приведены в специальных таблицах в литературе по теории вероятностей;

$z = \frac{P_T - M[P]}{\sigma[P]}$  – нормированная случайная величина;

$P_T$  – суммарная мощность электростанции;

$\sigma[P] = \sqrt{D[P]}$  – среднее квадратичное отклонение потребляемой мощности.

Для определения суммарной мощности электростанции необходимо решить обратную задачу, т.е. необходимо на основе рассчитанного математического ожидания и дисперсии суммарной потребляемой мощности найти такое количество генерируемой мощности, которое с заданной вероятностью обеспечило бы в любой фиксированный момент времени всех потребителей электроэнергией. Для этого необходимо из выражения (6) по заданному значению вероятности  $\rho$  определить  $\varphi_0(z)$ , далее по таблицам по известному  $\Phi_0(z)$  вычислить  $z$ , затем по данным  $M[P]$  и  $\sigma[P]$  и найденному значению  $z$  определить необходимую генерируемую мощность

$$P_T = M[P] + z\sigma[P].$$

## II. Табличный метод определения мощности электростанции

При проектировании судов преимущественно применяют табличный метод. Расчёт выполняют в виде таблицы (см. табл. 1), в которой указывают все эксплуатационные режимы судна, вызывающие изменения нагрузки СЭС.

Согласно требованиям Правил Регистра расчёт нагрузки СЭС выполняют для следующих режимов:

- а) ходовой режим;
- б) маневры;

- в) стоянка;
- г) аварийный, при работе основных источников электрической энергии (пожар, получение судном пробойны);
- д) другие режимы в соответствии с назначением судна:
  - ход судна во льдах (ледокол);
  - ход в чистой воде (ледокол);
  - грузовые операции (танкер) и др.

Во всех случаях в таблице определения мощности необходимо предусматривать характерные для данного судна режимы, соответствующие наибольшей и наименьшей загрузке электростанции.

Таблица 1

**Форма таблицы для определения мощности электростанции переменного тока**

Наименование механизмов и другого оборудования	Количество однотипного оборудования	Номинальная мощность, РМ ном.	Номинальные данные приёмников из каталога				Коэффициент использования	Потребная мощность				Режим (ходовой)			
			тип	мощность, РД ном.	КПД, η Д. ном	cosφ <sub>Дном</sub>		еди- ничная		сум- марная		коэффициент загрузки механиз- ма, КМ	коэффициент одновременности К <sub>0</sub>	активная мощность, P <sub>реж</sub> , кВт	реактивная мощность, Q <sub>реж</sub> , квар
								активная, Р, кВт	реактивная, Q, квар	активная, п.Р	реактивная, п. Q				
2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1. Рулевая машина	2	4	4A112 M4O M2	5, 5	0, 5	0,85 0,62	0, 7 3	4, 7 0	3, 99	9, 39	7, 9 8	0,4	0,5	1, 8	3,9
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
24. Вентилятор воздушного отопления	1	3	4A100 L4OM 2	4	0, 8	0,84 0,65	0, 9 5	4, 5 8	2, 99	4, 58	2, 9 9	0,7	1	3, 2	2,9
Сумма мощностей потребителей $\sum P_{реж.}; \sum Q_{реж.}$							Постоянно работающих								
							Периодически работающих								
							Эпизодически работающих								
							Итого								
То же с учётом общего коэффициента одновременности: $K'_0 \sum P_{реж.}; K'_0 \sum Q_{реж.}$							Постоянно работающих				$K'_0$				
							Периодически работающих				$K'_0$				
							Эпизодически работающих				$K'_0$				
							Итого								
То же, с учётом потерь в сети 5 %															
Полная мощность															
Средневзвешенный коэффициент мощности															
Количество, тип, мощность работающих генераторов															

В таблице указан только один режим – в качестве примера. Прочие режимы должны составляться аналогично.

После заполнения граф необходимо подсчитать итоговые значения. Для этого надо все потребители, работающие в рассматриваемом режиме, распределить в зависимости от характера на постоянно работающие, периодически работающие и эпизодически работающие.

В строке «суммарная мощность» подсчитываются суммы мощностей отдельно для потребителей различного характера работы, а затем итоговая сумма. Подсчёт мощностей осуществляется как активных, так и реактивных составляющих. В строке «То же, с учётом коэффициента одновременности» определяются произведения каждой суммы мощностей на соответствующий коэффициент одновременности, а затем подсчитывается итоговое значение. Значения коэффициента  $K'_0$  определяются опытным путём.

Следует помнить, что один и тот же механизм в различных режимах может иметь равный характер работы по времени. Например, пожарный насос в аварийном режиме – постоянно работающий потребитель, а в ходовом, если необходимо мыть палубу и клюз, эпизодически работающий.

Для выбора генераторов определяют так называемый средневзвешенный коэффициент мощности  $\cos \varphi_{ср.в}$ . Он получается по значению  $\cos \varphi_{ср.в} = \frac{P_{об}}{S_{об}}$  для каждого режима.

Далее производится выбор числа и мощности источников электроэнергии. Для этого составляется таблица комплектации, в которой рассматриваются не менее 3 вариантов и рекомендуется сравнение произвести по следующим показателям, рассмотренным в таблице 2.

Таблица 2

Показатель	Варианты		
	1	2	3
Комплектация	3ДГ×500	2ДГ×750	1ВГ×600 2ДГ×300
Мощность СЭС, кВт	1500	1500	1200
Масса агрегатов, Т	–	–	–
Стоимость агрегатов, руб.	–	–	–
Себестоимость электроэнергии, руб./кВт·ч	–	–	–
-			
Обслуживание	Простое	Самое простое	Сложное
Живучесть	Высокая	Самая низкая	Средняя
Надежность	–	–	–

Выбранная таким образом мощность судовой электростанции, как показали расчеты по данным теплохода проекта 92-016, оказалась завышенной на 10–15% из-за разброса коэффициента загрузки, коэффициента использования и распределения потребителей на эпизодические, периодические и постоянные режимы работы, по сравнению с вероятностным методом расчета.

**Список литературы:**

- [1] Самулеев В.И. Судовые электроэнергетические системы: курс лекций / В.И. Самулеев. – Н. Новгород : Изд-во ФГОУ ВПО «ВГАВТ», 2011. 444 с.
- [2] Самулеев В.И. Определение мощности судовой электростанции: учеб. пособие / В.И. Самулеев, В.В. Александров, Т.Н. Гусакова – Н. Новгород : Изд-во ФБОУ ВПО «ВГАВТ», 2013. – 100 с.
- [3] Лейкин В.С. Автоматизированные электроэнергетические системы промысловых судов: учебник / В.С. Лейкин, В.А. Михайлов – М. : Транспорт, 1987. – 327 с.

*В.Г. Сузаков, Ю.С. Малышев, А.А. Тоцев, И.И. Ягжов*  
ФГБОУ ВО «ВГУВТ»

## УСТРОЙСТВО КОРРЕКЦИИ ФОРМЫ КРИВОЙ НАПРЯЖЕНИЯ

Качество электрической энергии, устройство коррекции формы кривой напряжения, напряжение, пассивные фильтры, активные фильтры

Рассмотрены существующие системы регулирования напряжения и корректоры напряжения генераторов переменного тока, а так же пассивные и активные фильтры. Выявлены недостатки указанных устройств и, учитывая выявленные недостатки, предложено устройство коррекции формы кривой напряжения, которое корректирует мгновенное значение напряжения, сети приближая его форму к идеальной синусоиде.

В настоящее время известны системы регулирования напряжения и корректоры напряжения генераторов переменного тока [1,2].

Система автоматического регулирования напряжения (САРН) представляет собой, как правило, комбинированные устройства компаундирования и регулятора (или корректора) напряжения. Комбинированные САРН реализуют принципы регулирования по отклонению и по возмущению, и обладают их достоинствами. В таких системах наряду с замкнутым контуром, образованным главной обратной связью, имеется цепь компенсации основного возмущающего воздействия. Такие системы с достаточно высокой точностью поддерживают величину выходного напряжения, однако недостатком существующих систем регулирования напряжения и корректоров напряжения генераторов переменного тока является невозможность сохранения синусоидальной формы кривой напряжения при работе на нелинейную нагрузку, вызывающую высшие гармонические составляющие.

Для устранения высших гармонических составляющих, как правило, применяют пассивные и активные фильтры [3], подавляющие высшие гармонические составляющие и улучшающие форму кривой напряжения в сети генераторов переменного тока автономных источников электрической энергии. Они работают по принципу измерения и передачи в сеть высших гармоник тока или напряжения, находящихся в противофазе с высшими гармониками сети.

Недостатком фильтров является недостаточная эффективность, обусловленная неидеальностью реальных фильтров, у которых частота среза не совпадает с частотой задерживания, и нестабильностью частоты автономных источников электрической энергии. Кроме того, фильтры настроены на определенный спектр гармонических составляющих, что не позволяет добиться достаточного качества формы кривой напряжения.

Учитывая недостатки проанализированных выше систем, предлагается устройство, которое позволяет корректировать форму кривой напряжения.