

# МАНЕВРИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЕМ

1. Постановка задачи
2. Горизонтальное маневрирование
3. Вертикальное маневрирование

Часть 1. Горизонтальное маневрирование

# 1. Постановка задачи

***Маневрирование электропотреблением*** - совокупность организационно-технических и технико-экономических мероприятий, имеющих целью отработку вынужденного графика электропотребления без снижения и изменения номенклатуры продукции, выпускаемой предприятием

В настоящее время возможны два пути решения проблемы отработки вынужденных графиков нагрузки:

1. *энергосистема задает ограничения* по мощности в часы максимума своей нагрузки и лимит энергии на фиксированный период времени;
2. *энергосистема задает вынужденный график электропотребления* на весь период времени.

Так как объектом управления является график нагрузки, представленный на декартовой плоскости, то математически задачу маневрирования удобно свести к задаче изменения координат этого графика.

При этом различают:

- вертикальное маневрирование ( по оси ординат);
- горизонтальное маневрирование (по оси абсцисс);
- декартово маневрирование (по декартовой плоскости).

## 2. Горизонтальное маневрирование

### *2.1. Принцип горизонтального маневрирования*

Принцип горизонтального маневрирования нагрузкой заключается в следующем:

**при сохранении расхода электроэнергии на технологический процесс, снижения максимума нагрузки и уменьшения потерь электроэнергии в сетях можно достичь путем размещения во времени индивидуальных графиков нагрузок электроприемников, при котором групповой график нагрузки будет иметь минимальную неравномерность.**

Выравнивание совмещенного графика нагрузки при этом достигается не за счет изменения формы индивидуальных графиков отдельных электроприемников, а за счет их смещения один относительно другого, т.е. горизонтального смещения по оси времени

## ***2.2. Критерий неравномерности графика нагрузки***

Расчеты по организации совместного режима работы группы электроприемников с целью выравнивания совмещенного графика нагрузки при горизонтальном маневрировании основываются на теории корреляции электрических нагрузок и сводятся к определению порядка (последовательности) включения во времени отдельных электроприемников в группе, а также временных интервалов (сдвигов), через которые они включаются.

Неравномерность нагрузки  $p(t)$  характеризуется дисперсией  $DP$ :

$$DP = P_{\text{СК}}^2 - P_{\text{с}}^2$$

где  $P_{\text{с}}$ ,  $P_{\text{СК}}$  – средняя и среднеквадратичная мощность графика  $p(t)$ , кВт

**Дисперсия группового графика нагрузки  $n$  электроприемников** определяется суммой двух составляющих – *независимой* от размещения во времени отдельных графиков нагрузки и *корреляционной*, обусловленной взаимным расположением индивидуальных графиков:

$$DP(t_{12}, \dots, t_{1n}, \dots, t_{n-1,n}) = \sum_{j=1}^n Dp_j + 2 \cdot \sum_{\substack{j=1 \\ i < j}} k_{P_{ij}}(t_{ij})$$

где  $Dp_j$  – дисперсия  $j$ -го графика нагрузки  $p_j(t)$ ;

$k_{P_{ij}}(t_{ij})$  – взаимокорреляционная функция графиков нагрузки  $i$ -го и  $j$ -го электроприемников  $p_i(t)$  и  $p_j(t)$ ;

$t_{ij}$  – сдвиг во времени между графиками (моментами включения) электроприемников  $p_i(t)$  и  $p_j(t)$ .

## ВКФ двух графиков нагрузки $p_a$ и $p_b$

$$kP_{ab}(t_{ab}) = \frac{Dp_{ab}(t_{ab}) - (Dp_a + Dp_b)}{2}$$

где  $Dp_a$ ,  $Dp_b$  – дисперсии графиков нагрузки  $p_a$  и  $p_b$ ;  
 $Dp_{ab}(t_{ab})$  – дисперсия совмещенного графика нагрузки  $p_a + p_b$   
при смещении по оси времени графика  $p_b$  на интервал  $t_{ab}$   
относительно графика  $p_a$ .

ВКФ двух графиков нагрузки численно характеризует изменение равномерности суммарного графика  $P_{ab}(t_{ab}) = p_a(t) + p_b(t)$  при смещении момента включения (а, следовательно, и всего графика) электроприемника с графиком  $p_b(t)$  относительно  $p_a(t)$ .  
Наименьшее значение  $kP_{ab}(t_{ab})$  соответствует наибольшей равномерности  $P_{ab}(t_{ab})$ .

Решение задачи выравнивания группового графика нагрузки состоит в определении сдвигов  $t_{ij}$  между моментами включения электроприемников, приводящих к минимуму корреляционной составляющей дисперсии совмещенного графика нагрузки:

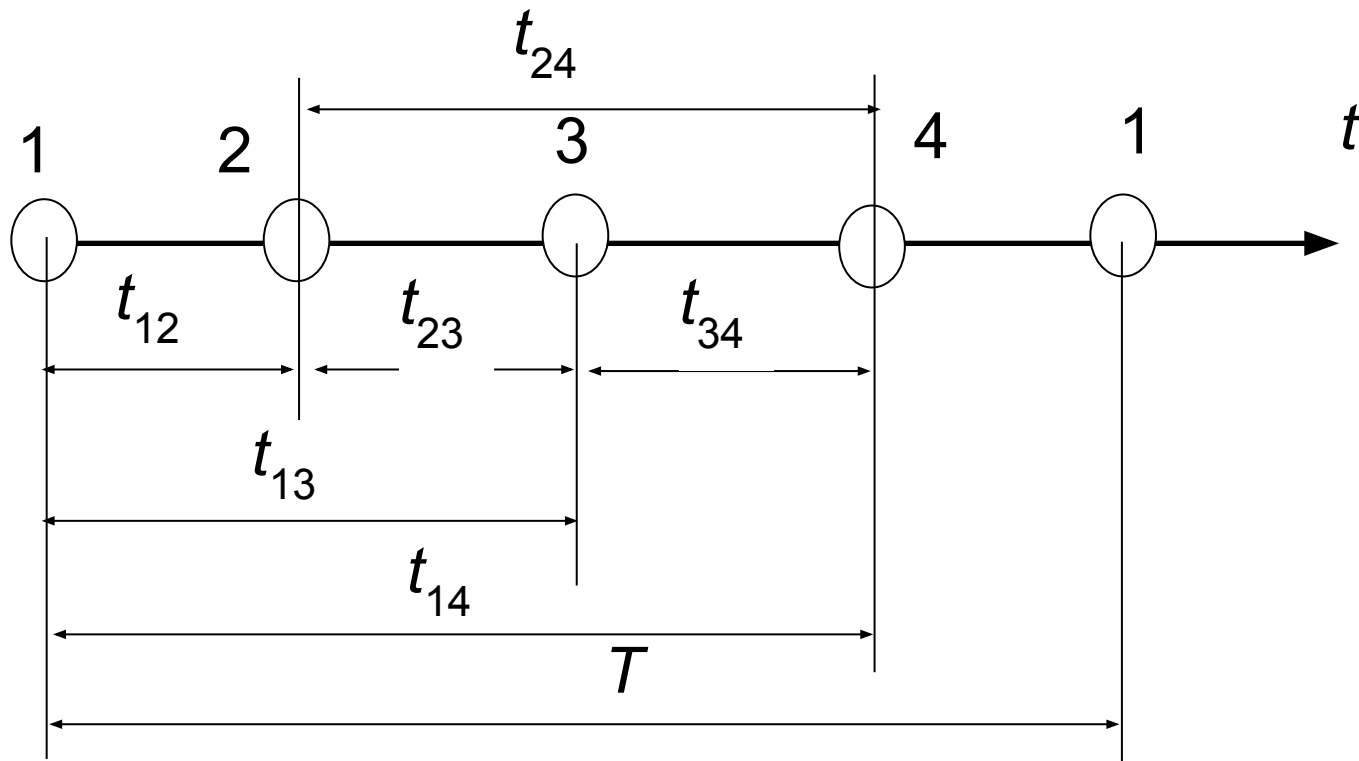
$$D_{\text{к}}(t_{ij}) = 2 \cdot \sum_{\substack{j=1 \\ i < j}} k p_{ij}(t_{ij}) \rightarrow \min$$



## 2.3. Определение оптимальных смещений графиков нагрузки

Т. к. задание некоторых сдвигов  $t_{ij}$  может влиять или полностью определять возможные значения других сдвигов, то все сдвиги качественно делятся на:

- *независимые*  $t_{H3} = 0 \div T,$
- *ограниченно зависимые*  $t_{O3} = t_{H3} \div T,$
- *зависимые*  $t_3 = \sum t_{H3} + \sum t_{O3}$



Если в группе из  $n = 4$  электроприемников принять

**независимыми** -  $t_{12}$ ,  $t_{13}$  и  $t_{14}$ ,

то **зависимые** -  $t_{23} = t_{13} - t_{12}$ ,  $t_{34} = t_{14} - t_{13}$ ,  $t_{24} = t_{14} - t_{12}$ .

Если принять

**независимым**  $t_{12}$ ,

то **огр-зависимые**  $t_{23} = t_{12} \div T$ ,  $t_{34} = (t_{12} + t_{23}) \div T$ ,

**зависимые**  $t_{13} = t_{12} + t_{23}$ ,  $t_{24} = t_{23} + t_{34}$ ,  $t_{14} = t_{12} + t_{23} + t_{34}$

## Алгоритм поиска значений $t_{ij}$

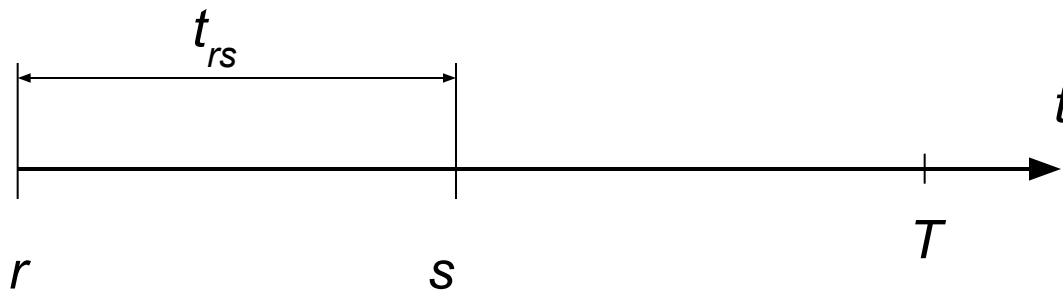
- заключается в пошаговом формировании совмещенного графика нагрузки из  $N$  индивидуальных графиков, причем на каждом шаге дисперсия совмещенного графика  $DP$  должна убывать с максимальной скоростью:

1. Рассчитывается множество ВКФ графиков нагрузок для всех пар электроприемников  $\{kp_{ij}(t_{ij})\}$ ,  $i = 1 \div N-1; j = 1 \div N; i < j$ .

2. Из множества  $\{kp_{ij}(t_{ij})\}$  выбирается ВКФ для электроприемников  $r, s$  для которой ВКФ имеет наименьшее значение при некотором сдвиге  $t_{rs}$

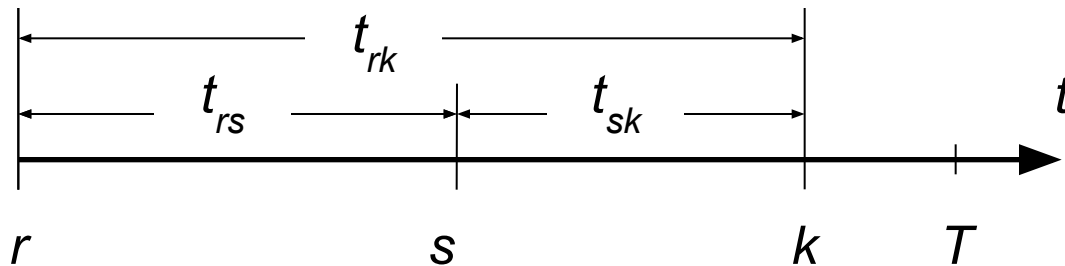
$$kp_{rs}(t_{rs}) = \min \{kp_{ij}(t_{ij})\}$$

3. На ось времени наносятся моменты включения электроприемников с номерами  $r$  и  $s$ , отстоящими друг от друга на интервал (сдвиг)  $t_{rs}$ .



4. Для каждого из оставшихся  $K=N-2$  электроприемников выполняется следующая процедура:

4.1. На ось времени условно наносится момент включения  $k$ -го электроприемника,  $k=1\div K$ , и определяются независимые и зависимые сдвиги с учетом наличия на оси времени моментов включения других электроприемников ;



4.2 Для независимых сдвигов задается ряд возможных значений в диапазоне  $[0 \div T]$  и рассчитываются значения соответствующих зависимых сдвигов;

$$t_{rk} = [0 \div T] \quad \text{– независимый;}$$

$$t_{sk} = t_{rk} - t_{rs} \quad \text{– зависимый;}$$

4.3. Для текущей группы электроприемников, представленной на оси времени, определяется множество сумм взаимокорреляционных моментов для каждого значения независимого сдвига:

$$S_k(t_{rk}) = kp_{rs}(t_{rs}) + kp_{rk}(t_{rk}) + kp_{sk}(t_{sk})$$

4.4. Из множества  $S_k(t_{rk})$  выбирается минимальное значение и помещается в массив

$$S^{min} = \{ S_k^{min} \}$$

4.5. Повторяются пп. 4.1-4.4 для других электроприемников.

5. Из множества значений минимальных сумм взаимокорреляционных моментов

$$S^{min} = \{S_1^{min}, S_2^{min}, \dots, S_{N-2}^{min}\}$$

выбирается минимальная, соответствующая некоторому электроприемнику с номером  $k^{min}$ , а на оси времени фиксируется момент включения этого электроприемника в соответствии со значениями независимых и зависимых сдвигов  $t_{rk}^{min}$ ,  $t_{sk}^{min}$ ;

6. Повторяются пп.4-5 для оставшихся графиков до тех пор, пока моменты включения для всех электроприемников не будут размещены на оси времени

## ПРИМЕР.

Рассмотрим работу трех электроприемников  $a$ ,  $b$ ,  $c$ , графики которых, осредненные на шести интервалах времени, приведены в табл.

Интервал	Мощность, кВт			
	$P_a$	$P_b$	$P_c$	$P_{abc} = P_a + P_b + P_c$
1	30	20	10	60
2	50	35	15	100
3	70	63	7	140
4	70	57	13	140
5	40	37	3	80
6	60	48	12	120



Дисперсия совмещенного графика нагрузки  $P_{abc}$  является функцией трех переменных  $t_{ab}$ ,  $t_{ac}$ ,  $t_{bc}$  – сдвигов между исходными графиками нагрузок электропримеников:

$$DP_{abc}(t_{ab}, t_{ac}, t_{bc}) = DP_a + DP_b + DP_c + \\ + 2 \cdot [kp_{ab}(t_{ab}) + kp_{ac}(t_{ac}) + kp_{bc}(t_{bc})]$$

Максимум равномерности будет достигаться при минимальном значении корреляционной составляющей дисперсии  $Dk$ :

$$Dk(t_{ab}, t_{ac}, t_{bc}) = 2 \cdot [kp_{ab}(t_{ab}) + kp_{ac}(t_{ac}) + kp_{bc}(t_{bc})]$$

## Расчет ВКФ графиков нагрузки $P_a$ и $P_b$

Интервал	Мощность, кВт		Сдвиг $t_{ab}$						
	$P_a$	$P_b$	0	1	2	3	4	5	6
$i$	$P_a$	$P_b$	0	1	2	3	4	5	6
1	30	20	50	70	90	90	60	80	50
2	50	35	85	105	105	75	95	65	85
3	70	63	133	133	103	123	93	113	133
4	70	57	127	97	117	87	107	127	127
5	40	37	77	97	67	87	107	107	77
6	60	48	108	78	98	118	118	88	108
$Pc^2$ , кВт <sup>2</sup>	2844,44	1877,78	9344,4	9344,4	9344,4	9344,4	9344,4	9344,4	9344,4
$Pck^2$ , кВт <sup>2</sup>	3066,67	2086,00	10189, 33	9752,6 7	9586,0 0	9652,6 7	9682,6 7	9786,0 0	10189, 33
$DP$ , кВт <sup>2</sup>	222,22	208,22	844,89	408,22	241,56	308,22	338,22	441,56	844,89
$kp$ , кВт <sup>2</sup>			207,22	-11,11	-94,44	-61,11	-46,11	5,56	207,22

## Значения ВКФ графиков нагрузки при различных сдвигах

$k_p,$ кВт <sup>2</sup>	Сдвиг $t_{ij}$						
	0	1	2	3	4	5	6
ab	207, 22	-11,1 1	<b>-94,4</b> <b>4</b>	-61,1 1	-46,1 1	5,56	207, 22
ac	15,0 0	<b>-16,6</b> 7	50,0 0	-16,6 7	1,67	-33,3 3	15,0 0
bc	-1,00	-6,83	41,3 3	-3,00	-7,00	<b>-23,5</b> <b>0</b>	-1,00

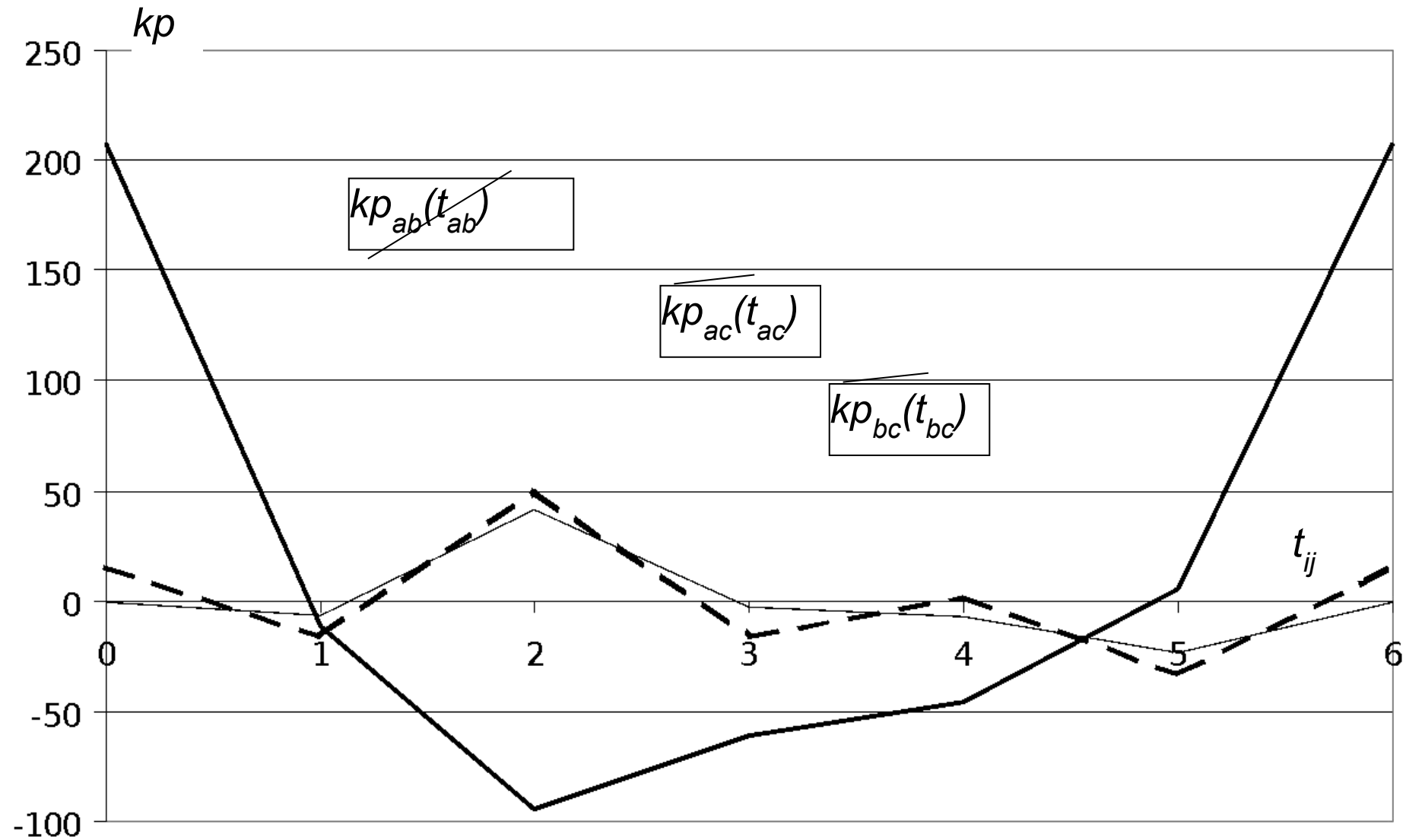
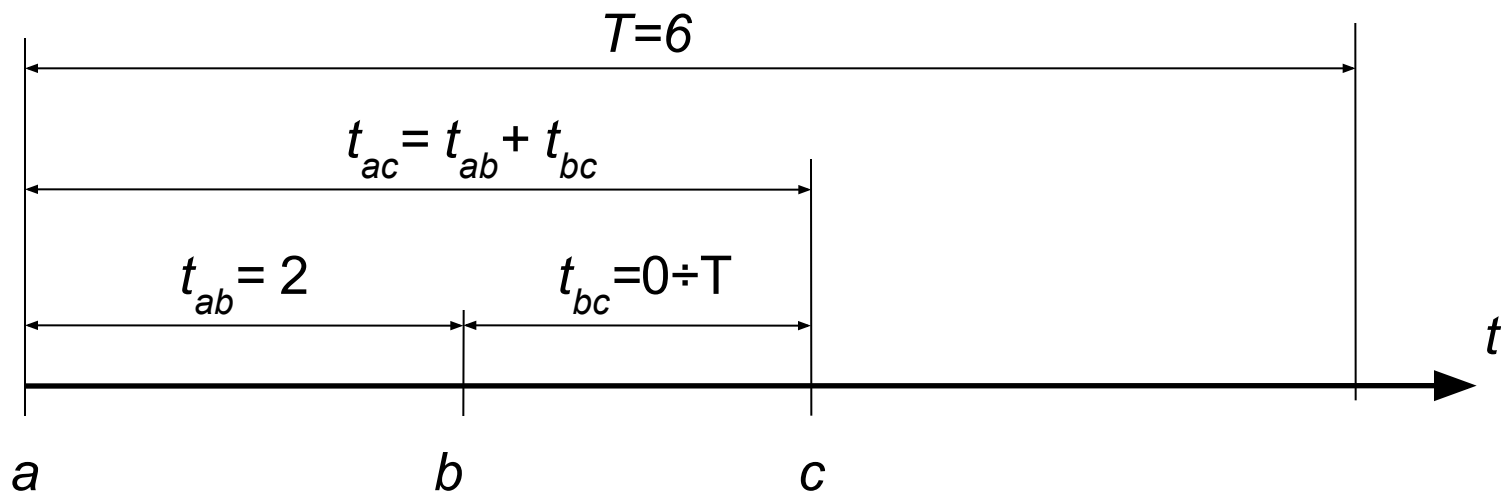


Схема размещения во времени моментов включения электроприемников  $a$ ,  $b$ ,  $c$ .



Значения ВКФ  $kp_{ac}(t_{ac})$  и  $kp_{bc}(t_{bc})$  и их суммарное значение

$t_{bc}$	$t_{ac} = 2 + t_{bc}$	$kp_{bc}(t_{bc})$	$kp_{ac}(t_{ac})$	$kp_{ac}(t_{ac}) + kp_{bc}(t_{bc})$
0	2	-1,00	50,00	49,00
1	3	-6,83	-16,67	-23,50
2	4	41,33	1,67	43,00
3	5	-3,00	-33,33	-36,33
4	0	-7,00	15,00	8,00
5	1	<b>-23,50</b>	<b>-16,67</b>	<b>-40,17</b>

Графики нагрузок электроприемников  $a$ ,  $b$ ,  $c$  при оптимальном размещении во времени.

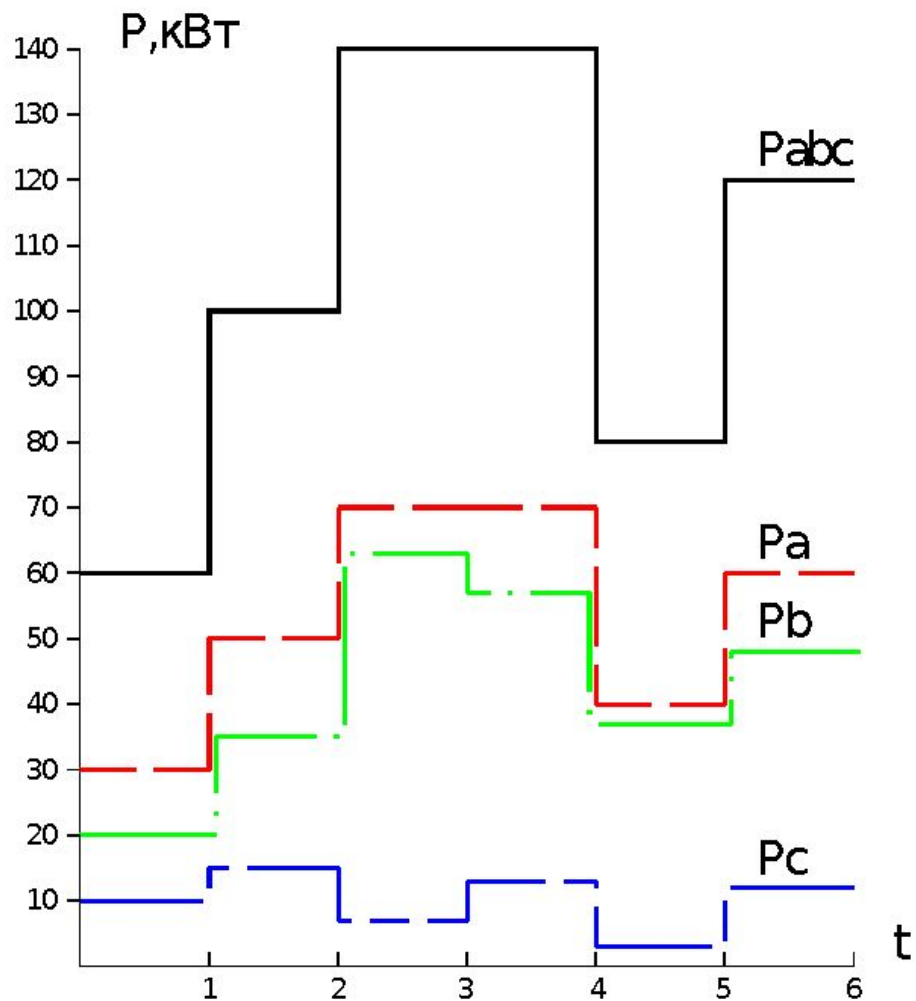
Интервал	Мощность, кВт			
$i$	$P_a$	$P_b$	$P_c$	$P_{abc}$
1	30	37	12	79
2	50	48	10	108
3	70	20	15	105
4	70	35	7	112
5	40	63	13	116
6	60	57	3	120
$DP$	222,22	208,22	16,00	177,22

**Задание:** самостоятельно составить расчетные выражения для зависимого сдвига и определить комбинации возможных сдвигов во времени, если бы на 1-м шаге был определен сдвиг

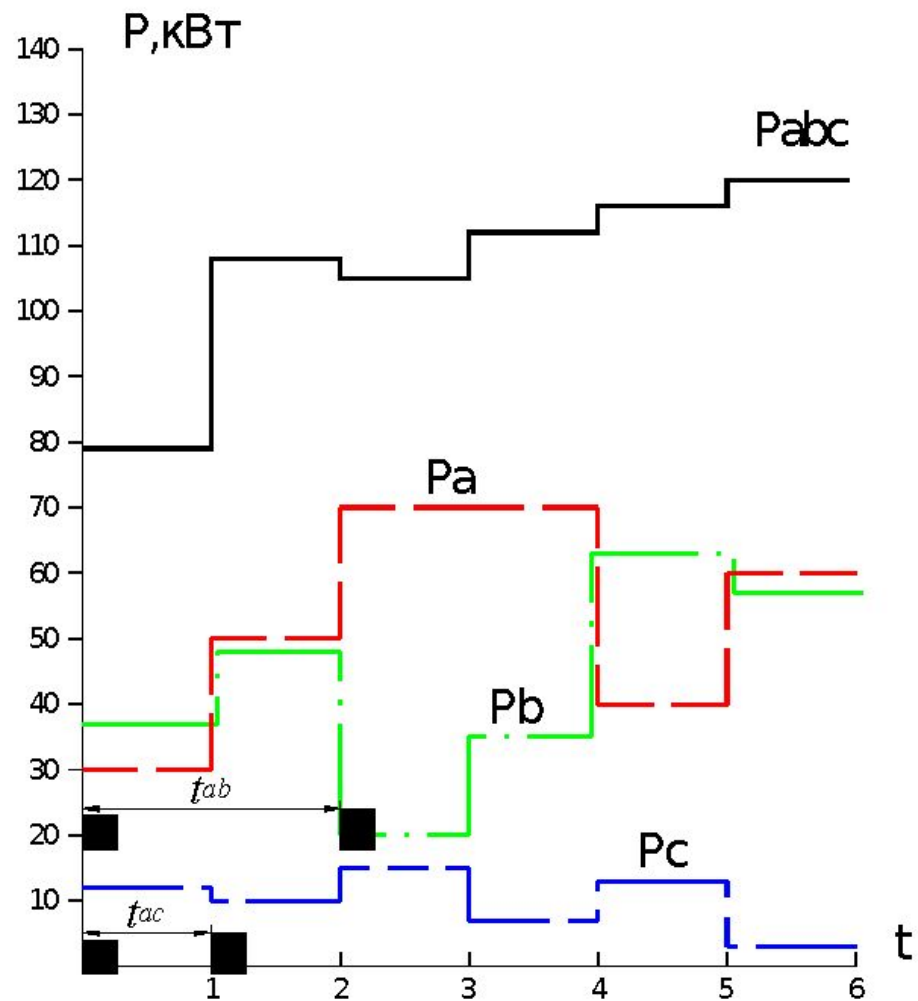
1.  $t_{bc} = 2$

2.  $t_{ac} = 2$





а)



б)

Графики нагрузки электроприемников и совмещенный график нагрузки

а) в исходном режиме;

б) при оптимальных сдвигах во времени.