

Хол. техн., № 3, 1979 г.

УДК 628.84.001.24:517

Гармонический анализ в расчетах систем кондиционирования воздуха с позиционным регулированием

Канд. техн. наук А. Г. СОТНИКОВ

Ленинградский технологический институт
холодильной промышленности

В технике кондиционирования воздуха применяют различные законы регулирования параметров. Выбор закона регулирования зависит от многих обстоятельств. Среди них — требования к точности поддержания параметра, к качеству переходного процесса, статические и динамические характеристики отдельных звеньев СКВ (тепломассообменное оборудование помещения, воздуховоды), образующих объект регулирования.

В настоящее время можно выделить несколько областей применения позиционного регулирования СКВ.

Производственные процессы, требующие поддержания определенной температуры для обработки деталей (изделий, приборов, оборудования). Оценим статические и динамические характеристики деталей, что необходимо для выявления условий применения позиционного регулирования температуры. С этой целью проанализируем результаты расчетов на ЭВМ температурного режима твердых тел. Будем полагать, что действительная форма детали позволяет заменить ее одним из канонических тел: пластиной, шаром или цилиндром. Выберем граничные условия третьего рода при скачкообразном изменении температуры воздуха в помещении.

Во всех случаях для детали произвольной или канонической формы, «утопленной» в воздухе помещения, коэффициент передачи как отношение приращений температур детали и воздуха в установившемся процессе $k_d = 1$. Другими словами: деталь стремится принять температуру воздуха в помещении. Переходный температурный режим детали можно достаточно точно описать экспоненциальной функцией [3]. В дальнейшем будем рассматривать среднеинтегральную постоянную времени T . Эта величина соответствует описанию динамических свойств детали в сосредоточенных параметрах. Значение T удобно определять по графику переходного температурного режима детали, имеющей форму пластины, цилиндра или шара (рис. 1) в зависимости от определяющего геометрического размера δ^* (толщина), теплофизических характеристик материала детали λ , a (теплопроводность и температуропроводность) и коэффициента кон-

вективного теплообмена α . Для пластины определяющим размером будет половина толщины ($\delta^* = \delta/2$), для шара и цилиндра — радиус ($\delta^* = R$).

Определим соотношение между величиной и продолжительностью отклонения температуры при позиционном регулировании для создания допустимых колебаний температур детали. Используем ее свойства как простейшего инерционного звена. Для термочувствительной детали можно записать:

$$A_{t_d} = \frac{k_d}{\sqrt{T^2 \omega^2 + 1}} \quad A_{t_B} = \frac{k_d}{\sqrt{4\pi^2 i^2 (T/\tau_{tp})^2 + 1}} A_{t_d}, \quad (1)$$

где A_{t_d} — допустимая по технологическим требованиям амплитуда температурных колебаний детали в некотором ее слое (например, средняя по массе);

k_d — коэффициент передачи детали, равный 1;

T — среднеинтегральная постоянная времени детали, определяемая по графику (см. рис. 1);

ω — круговая частота колебаний при работе позиционного регулятора, равная $2\pi/\tau_{tp}$;

A_{t_B} — амплитуда температурных колебаний воздуха;

i — порядковый номер гармоники по уравнению (8);

τ_{tp} — период колебаний при работе позиционного регулятора.

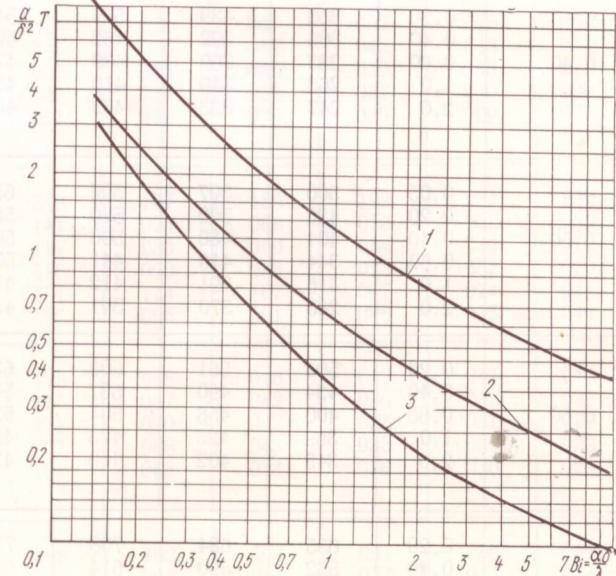


Рис. 1. Зависимость среднеинтегральной постоянной времени детали при скачкообразном изменении температуры воздуха в помещении от критерия Bi :
1 — пластина; 2 — цилиндр; 3 — шар.

Анализируя формулу (1), можно определить характерные интервалы соотношений T/τ_{π} .

При $T/\tau_{\pi} > 0,5$ в знаменателе формулы (1) можно пренебречь единицей ввиду ее малости, тогда

$$A_{t_{\pi}} = \frac{k_{\pi}}{2\pi i T} A_{t_B} \tau_{\pi} = \frac{A_{t_B} \tau_{\pi}}{2\pi i T}. \quad (2)$$

При этом соотношение амплитуды колебаний детали в равной степени зависит как от периода, так и от амплитуды колебаний температуры в помещении. Критерием качества переходного процесса в САР в этом случае является минимальная интегральная ошибка:

$$F = \int_0^{\tau_{\pi}} t_B dt \rightarrow \min. \quad (3)$$

При других соотношениях между T и τ_{π} деталь «чувствительна» в большей мере к амплитуде отклонений температуры и в меньшей

степени к периоду колебаний. В пределе при $T/\tau_{\pi} < 0,07$ деталь «чувствительна» только к амплитуде

$$A_{t_{\pi}} = k_{\pi} A_{t_B} = A_{t_B}. \quad (4)$$

Такой вывод следует из анализа формулы (1), в знаменателе которой остается единица. Таким образом, период колебаний температуры при позиционном регулировании существенно влияет на ее свойства как звена системы регулирования и на отклонения температур в детали.

Производственные процессы, требующие особо точного (прецзионного) поддержания температуры. Там, где кончиваются возможности серийных терморегуляторов, используют прецизионные СКВ. На основе предложения П. В. Участкина (1947 г.) и последующих исследований и разработок [1, 4] обосновано применение позиционного регулирования температуры в специальных СКВ, обеспечивающих малые отклонения температуры. Соотношения (1)–(4) спра-

α	β_1	$\bar{t}_{cp}/\bar{t}_{max} \cdot 10^3$ при β_2						$\bar{A}_{t_1}/\bar{t}_{max} \cdot 10^3$ при β_2					
		0,05	0,20	0,40	0,60	1,0	2,0	0,05	0,20	0,40	0,60	1,0	2,0
0,20	0,20	201	316	410	455	496	528	297	425	418	409	399	390
	0,40	178	292	386	432	472	505	254	394	397	393	387	382
	0,60	167	281	375	420	461	493	233	380	387	385	382	378
	1,0	156	271	365	410	451	483	215	367	378	379	377	375
	2,0	148	263	357	402	443	475	200	356	372	374	374	374
0,40	0,20	353	439	509	543	579	598	509	532	492	470	450	433
	0,40	306	392	462	496	527	551	441	485	459	444	430	419
	0,60	283	369	439	473	504	528	407	461	442	431	421	413
	1,0	263	349	419	453	484	508	376	440	428	420	413	408
	2,0	247	333	403	436	467	492	352	423	417	412	408	404
0,50	0,05	500	507	596	656	685	705	630	614	563	500	450	434
	0,20	425	500	520	580	610	613	617	605	570	500	456	442
	0,40	404	480	500	565	586	608	575	565	540	485	450	436
	0,60	344	419	441	500	526	550	574	500	480	450	430	421
	1,0	316	391	412	472	500	520	450	460	450	433	420	415
	2,0	285	370	391	450	480	500	426	435	443	422	415	410
0,60	0,20	504	561	608	631	651	667	571	532	485	461	440	423
	0,40	434	490	537	561	581	597	508	492	459	442	428	417
	0,60	400	456	504	527	547	563	475	470	444	431	420	412
	1,0	369	426	473	496	516	533	444	450	430	421	413	408
	2,0	345	402	449	472	492	508	420	433	419	413	408	405
0,80	0,20	655	684	708	719	729	737	466	425	394	380	367	356
	0,40	562	590	614	625	635	643	444	418	397	387	378	372
	0,60	516	545	568	580	590	598	427	409	393	385	379	374
	1,0	476	504	528	539	549	557	410	399	387	382	377	374
	2,0	443	472	495	507	517	525	395	390	382	378	375	374

ведливы и для этого случая. Меньшего уровня амплитуд A_{t_d} достигают при этом дополнительным затуханием температуры в специальном ограждении, разделяющем камеру (где находится деталь) и оболочку (где генерируются температурные колебания).

Создание в помещении динамического микроклимата, в котором периодически изменяется температура (или подвижность) воздуха. Такой микроклимат может быть эффективен на производствах, характеризующихся монотонностью труда, например в сборочных цехах, в помещениях, где установлены конвейеры. На основе исследований [2] определены благоприятные сочетания амплитуд и периодов температурных колебаний, благотворно влияющих на самочувствие человека и производительность труда. Предельные значения амплитуд температурных колебаний воздуха составили $A_{t_B} = 3^\circ\text{C}$, а периода $\tau_p = 2$ ч.

Объекты, в которых для кондиционирования воздуха применяют агрегированные автономные кондиционеры средней производительности и бытовые кондиционеры, оснащенные позиционными терморегуляторами. Во всех описанных и подобных случаях тепловой и температурный режимы характеризуются периодичностью. И нужно уметь определять средние значения и амплитуды потоков тепла и температур.

Рассмотрим, из каких условий рассчитывается настройка позиционных регуляторов. Основные параметры такого регулятора — зона нечувствительности δ_n (в $^\circ\text{C}$) и соответствующая ей скорость исполнительного механизма (ИМ) $1/T_c$ (в % хода ИМ/с):

$$\frac{1}{T_c} = \frac{\alpha \delta_n}{k_0 \tau_0}, \quad (5)$$

где α — коэффициент, зависящий от режима работы регулятора и определяемый по графику (рис. 2); k_0 — общий коэффициент передачи всех звеньев, входящих в объект, $^\circ\text{C}/\%$ хода ИМ; τ_0 — запаздывание в объекте, с.

$\bar{A}_{t2} / \bar{t}_{\max} \cdot 10^3$ при β_2						$\bar{A}_{t3} / \bar{t}_{\max} \cdot 10^3$ при β_2					
0,05	0,20	0,40	0,60	1,0	2,0	0,05	0,20	0,40	0,60	1,0	2,0
232	216	187	179	173	169	153	102	092	091	091	091
199	201	175	167	162	160	133	094	081	079	078	077
183	194	170	163	158	156	123	091	077	074	073	072
169	188	166	159	155	153	113	089	075	072	070	069
157	183	163	157	154	152	106	088	074	070	068	068
216	105	089	093	099	105	029	068	067	067	068	068
203	110	079	075	076	080	045	046	042	042	043	044
194	113	078	070	069	070	053	043	036	035	035	036
186	117	080	070	065	065	060	044	033	031	030	030
179	120	083	071	065	063	064	046	033	030	029	028
0	033	079	126	134	143	319	167	186	192	204	239
037	0	052	110	121	132	141	074	068	058	035	035
085	052	0	063	082	095	117	080	059	054	044	016
132	110	063	0	021	034	116	090	083	073	052	020
139	121	081	021	0	009	131	114	107	097	074	014
145	130	091	032	010	0	121	095	091	086	075	044
069	105	110	113	117	120	128	068	046	043	044	046
097	089	079	078	080	083	115	067	042	036	033	033
109	093	075	070	070	071	111	070	042	035	031	030
119	099	076	069	065	065	107	068	043	035	030	029
125	105	080	070	065	063	104	068	044	036	030	029
223	216	201	194	188	183	098	102	094	091	089	088
192	187	175	170	166	163	096	092	081	077	075	074
183	178	167	163	159	157	097	091	079	074	072	070
176	173	162	158	155	154	098	091	078	073	070	068
172	169	160	156	153	152	099	091	077	072	069	068

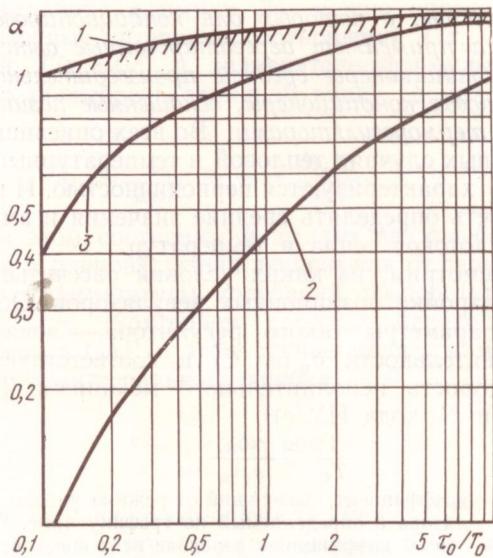


Рис. 2. График для нахождения коэффициента α , определяющего выбор зоны нечувствительности δ_n позиционного регулятора:
1 — граница устойчивости; 2 — процесс без перерегулирования;
3 — процесс с минимальным временем регулирования.

Если в объект регулирования входят не одно, а два или больше звеньев первого порядка, то допустимо в инженерных расчетах свести их к одному по методу Шаламона-Стрейца. Для обеспечения незатухающих колебаний во всей области отношений τ_o/T_o , как следует из графика рис. 2, значение α должно быть больше или равно единице. Если скорость хода ИМ известна, например $1/T_c = 100/60 = 1,7\%$ хода ИМ/с, то можно найти параметр настройки позиционного регулятора — его зону нечувствительности:

$$\delta_n = \frac{k_0 \tau_0}{\alpha} \frac{1}{T_c}. \quad (6)$$

В связи с широким применением позиционного регулирования в технике кондиционирования воздуха возникает ряд специфических задач. Все они связаны с периодическим, точнее квазистационарным, режимом работы теплообменного оборудования, кондиционируемых помещений, воздуховодов, а также аппаратов холодильных установок. Из-за аккумуляции тепла изменение температур и потоков тепла происходит обычно не мгновенно.

Изменение температуры достаточно точно можно представить экспоненциальной функцией. При этом одной экспонентой будем описывать нагревание воздуха в одной половине периода, а другой — охлаждение воздуха во второй половине периода. Если на коэффициент теплообмена влияет свободная или вынужденная конвекция, то изменение температуры описывается бо-

лее сложной, чем экспоненциальная, зависимостью.

Для получения общего решения в теории позиционного регулирования периодическое изменение параметра (например, температуры) представим в безразмерном виде (рис. 3). Общий период изменения параметра примем за единицу ($\tau_n=1$), продолжительность нагревания в долях от всего периода выражим величиной

$$\alpha = \tau_n / (\tau_n + \tau_o) = 0 \div 1;$$

тогда продолжительность охлаждения будет равна $1 - \alpha$. Постоянную времени процесса нагревания T_n и охлаждения T_o будем относить к соответствующей половине периода и обозначим:

$$\beta_1 = T_n / \alpha \tau_n; \quad \beta_2 = T_o / (1 - \alpha) \tau_n.$$

По вертикальной оси будет изменяться относительный параметр, например относительная температура \bar{t} . Общее изменение параметра примем $\bar{t}_{max} = 1$. Таким образом, с помощью безразмерных величин $\tau_n=1$, α , β_1 , β_2 , \bar{t} и $\bar{t}_{max}=1$ можно однозначно описать любую периодическую функцию в общем виде.

Если анализировать изменение температуры ($\bar{t}_{max} = 1$), то можно записать

$$\bar{t}(\tau) = \begin{cases} \frac{1 - \exp(-\tau/\alpha\beta_1\tau_n)}{1 - \exp(-1/\beta_1)} & \text{при } 0 \leq \tau \leq \alpha\tau_n; \\ \frac{\exp[(\tau_n - \tau)/(1 - \alpha)\beta_2\tau_n] - 1}{\exp(1/\beta_2) - 1} & \text{при } \alpha\tau_n \leq \tau \leq \tau_n. \end{cases} \quad (7)$$

Такая запись изменения относительной температуры в процессе нагревания и охлаждения позволяет «состыковать» функцию при $\tau = \alpha\tau_n$.

Изменения температуры, например приточного и внутреннего воздуха, обычно определяют опытным путем, а затем строят график или составляют таблицу температур. Значения β_1 и β_2 наиболее просто установить по кривым, построенным по опытным точкам на графике-шаблоне. На рис. 4 показаны линии, соответствующие разным значениям β_1 и β_2 в процессах

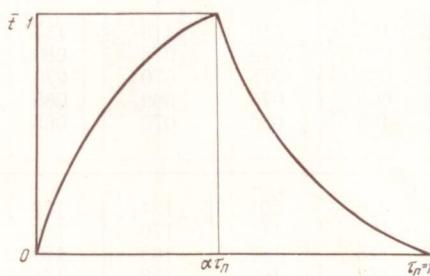


Рис. 3. График периодического изменения температуры, представленный экспонентами нагрева и охлаждения.

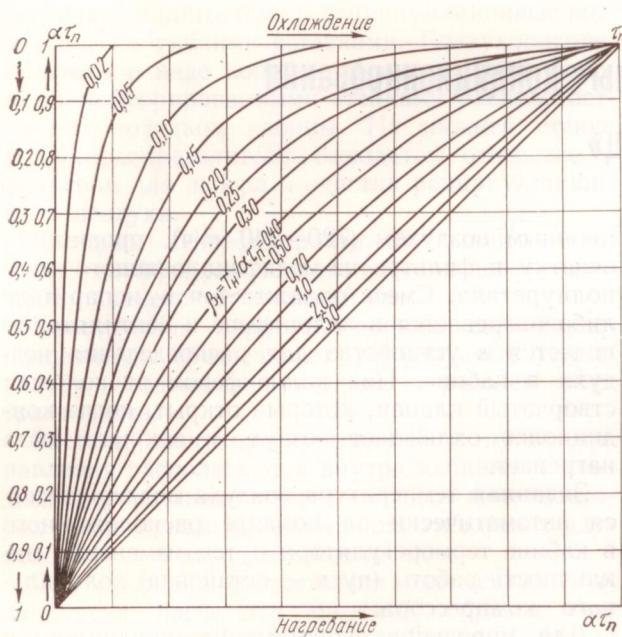


Рис. 4. Номограмма для определения коэффициентов β_1 и β_2 как отношений $T_n/\alpha\tau_n$ и $T_o/(1-\alpha)\tau_n$.

нагревания и охлаждения. Расположение опытных точек одновременно покажет, насколько правомерно процесс изменения температуры (или другого параметра) принимать экспоненциальным.

Функцию (7) разложим в ряд Фурье и представим текущее в момент времени t значение температуры, записанной в относительном виде, следующей зависимостью:

$$\bar{t}(t) = \bar{t}_{cp} + \sum_{i=1}^{\infty} \bar{A}_{ti} \cos \frac{2\pi i}{\tau_n} (t_i - t), \quad (8)$$

где \bar{t}_{cp} — средняя относительная температура за период τ_n ;

\bar{A}_{ti} — относительная амплитуда i -й гармоники разложения температуры в ряд Фурье;

i — порядковый номер гармоники.

t_i — время, соответствующее фазе колебаний температуры при $t=0$ для i -й гармоники колебаний.

Поскольку максимальная относительная температура \bar{t}_{max} принята равной единице, значения \bar{t}_{cp} , \bar{A}_{t1} (амплитуда основной гармоники), \bar{A}_{t2} (амплитуда второй гармоники) и т. д. меньше единицы и определяются своими мантиссами, т. е. значащими цифрами после запятой. Мантиссы средней относительной температуры и амплитуд первых трех гармоник вычислены нами на ЭВМ при различных сочетаниях α , β_1 и β_2 . По результатам расчета состав-

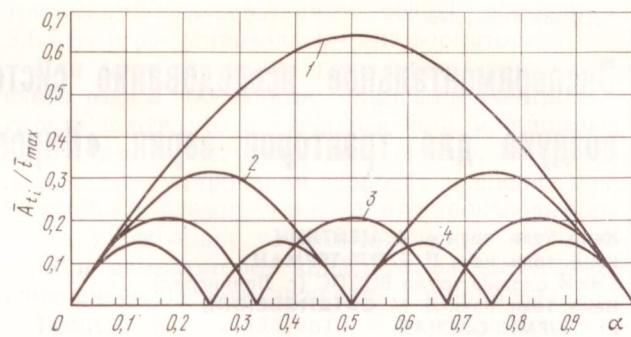


Рис. 5. График для определения амплитуд гармоник разложения прямоугольного периодического воздействия в гармонический ряд в зависимости от α :
1 — $\bar{A}_{t1}/\bar{t}_{max}$; 2 — $\bar{A}_{t2}/\bar{t}_{max}$; 3 — $\bar{A}_{t3}/\bar{t}_{max}$; 4 — $\bar{A}_{t4}/\bar{t}_{max}$.

лена трехзначная таблица мантисс нулевой, первой, второй и третьей гармоник разложения экспонент нагрева и охлаждения в гармонический ряд (при $\bar{t}_{max}=1$). Для промежуточных значений α , β_1 и β_2 нужно применять интерполяцию.

Частым, но достаточно характерным случаем изменения температуры является ее практически скачкообразное изменение. Это происходит при $\beta_1 \rightarrow 0$ и $\beta_2 \rightarrow 0$. В этом предельном случае искомые амплитуды гармоник в зависимости от α удобно определять по графику рис. 5.

Приводимые графики и таблица позволяют решать ряд теоретических и инженерных задач:

оценка правомерности аппроксимации изменения температуры при позиционном регулировании скачкообразной функцией;

определение средней относительной температуры (например, приточного и внутреннего воздуха) и отклонения от нее при изменении соотношения полупериодов («сползание» средней), а также средней рабочей разности температур и фактической тепловой нагрузки кондиционируемого объекта;

установление относительных амплитуд гармоник изменения температур и построение амплитудно-частотной характеристики объекта (на частотах $\omega_i = 2\pi i/\tau_n$).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- Ловцов В. В. Прецзионные системы кондиционирования воздуха. — Л., Стройиздат, 1971.
- Оценка влияния монотонности микроклимата на условия и производительность труда в сборочных цехах предприятий точного приборостроения. — Л., ВНИИ охраны труда ВЦСПС, 1976.
- Пехович А. И., Жидких В. М. Расчеты теплового режима твердых тел. — Л., Энергия, 1976.
- Хомутецкий Ю. Н. Установки кондиционирования воздуха для борьбы с температурной деформацией прецизионных деталей. — В кн.: Проблемы интенсификации холодильного и технологического пищевого оборудования. Л., 1968.