

PSRS AUGSTĀKĀS IZGLĪTĪBAS MINISTRIJA
PĒTERA STUCKAS LATVIJAS VALSTS UNIVERSITĀTE
МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР
ЛАТВИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ ПЕТРА СТУЧКИ

ZINĀTNISKIE RAKSTI УЧЕНЫЕ ЗАПИСКИ

XXI SĒJUMS * ТОМ XXI

RĪGA 1958 РИГА

REDAKCIJAS KOLEĢIJA.

Technisko zinātņu doktors, profesors J. G. P a n o v k o
Technisko zinātņu kandidats, docents K. K. G a i l i s
Technisko zinātņu kandidats, docenta v. i. J. B. V a s e r m a n i s

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Доктор технических наук, профессор Я. Г. П а н о в к о
Кандидат технических наук, доцент К. К. Г а й л и с
Кандидат технических наук, и. о. доцента Е. Б. В а с е р м а н



TECHNISKĀS ZINĀTNES
ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

6. IZLAIDUMS * ВЫПУСК 6

*Veltīts Oktobra revolūcijas
40. gadadienai*

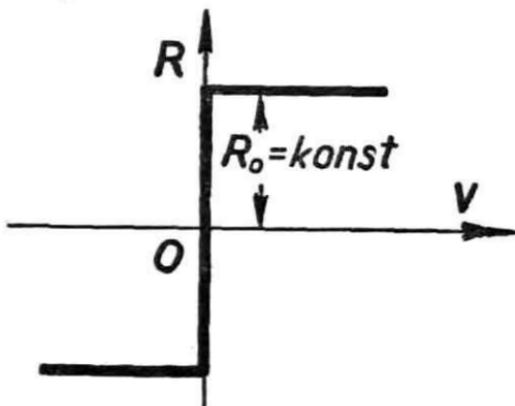
*Посвящается 40-й годовщине
Великого Октября*

А. М. СТРЕКИС, доцент, кандидат технических наук

ВЫНУЖДЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ СИСТЕМЫ С ОДНОЙ СТЕПЕНЬЮ СВОБОДЫ ПРИ НАЛИЧИИ СИЛЫ ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ, ЗАВИСЯЩЕЙ ОТ СКОРОСТИ

§ 1. Введение

В работах [2], [3], [4], [5] и других, посвященных изучению колебаний при наличии силы сухого трения, обычно принимается, что эта сила постоянна, т. е. не зависит от величины скорости (фиг. 1). Более точные исследования показали, что



Фиг. 1.

сила трения скольжения не является постоянной величиной, а зависит от скорости, давления, температуры и других факторов ([7]). На фиг. 2 показана зависимость силы трения от скорости скольжения при различных удельных давлениях.

При данном давлении сила трения зависит только от скорости, т. е.

$$R = f(v).$$

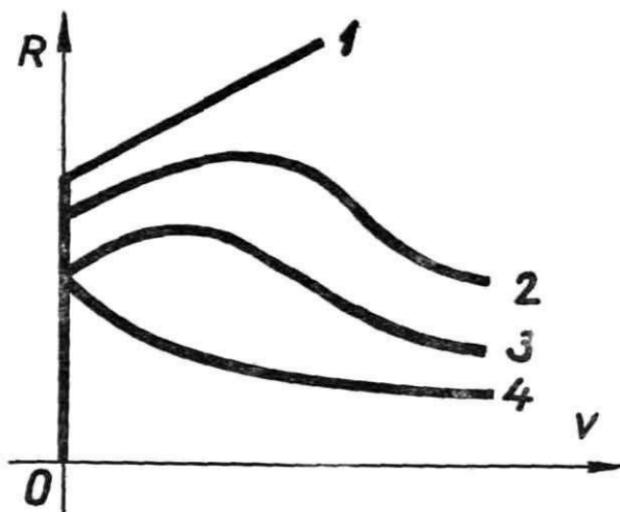
Если скорость меняет знак, то сила трения скольжения меняется скачкообразно и при отрицательной скорости имеет значение

$$R = -f(+v).$$

Существует ряд эмпирических формул для определения силы трения [7]; наиболее подходящей для дальнейших выкладок является следующая формула

$$R = R_0 \frac{1 + a_1 v + b_1 v^2}{1 + a_2 v + b_2 v^2}, \quad (1)$$

где a_1, a_2, b_1, b_2, R_0 — постоянные величины, v — значение скорости ($0 \leq v \leq v_{\max}$).



Фиг. 2.

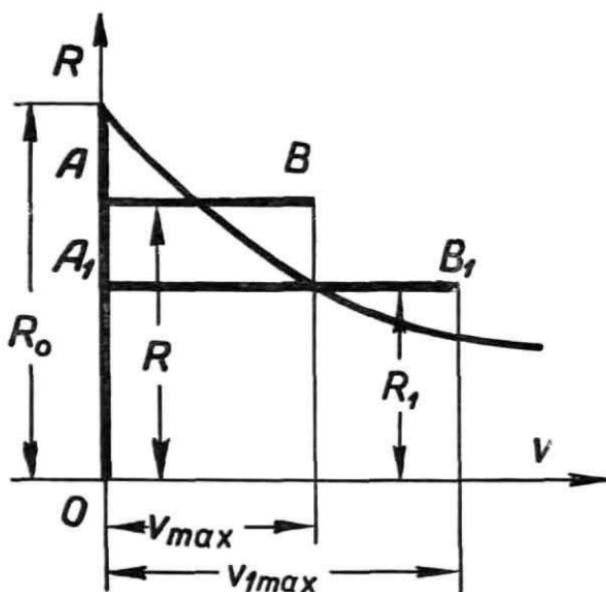
При соответствующих частных значениях коэффициентов эта формула достаточно хорошо отражает кривые 1, 2, 3, 4, показанные на фиг. 2.

Целью настоящей работы является исследование установившихся вынужденных колебаний в случае синусоидальной возмущающей силы при наличии трения скольжения, которое меняется по закону (1).

§ 2. Постановка вопроса

Ниже используется следующий приближенный способ. Кривая, которая описывается уравнением (1), линеаризуется в виде горизонтальной (фиг. 3), либо наклонной прямой (фиг. 4). В

первом случае (фиг. 3) расстояния R , R_1 горизонтальных прямых AB , A_1B_1 , а во втором случае (фиг. 4) наклон прямых AB , AB_1 зависит от максимальных скоростей v_{max} , v_{1max} . Третий вариант линейризации (фиг. 5) для данной силы трения (1) неприменим, ибо при такой линейризации теряется главная особенность силы трения скольжения а именно, скачкообразное изменение в местах, где скорость движения меняет знак, в связи с чем в случае колебаний не образуются зоны застоя.



Фиг. 3.

Для первого случая линейризации (фиг. 3) дифференциальное уравнение вынужденных колебаний можно написать в следующем виде:

$$\ddot{y} + k^2 y = F(t) \pm r, \quad (2)$$

где k — частота свободных колебаний,

$F(t)$ — приведенная возмущающая сила, т. е. возмущающая сила, разделенная на массу M колеблющегося тела,

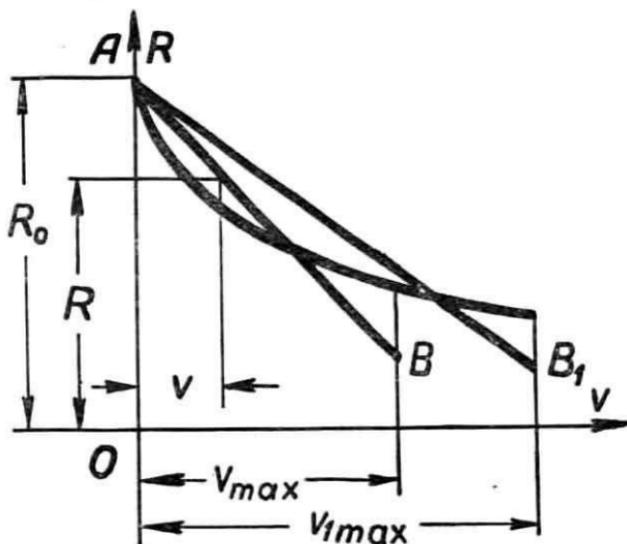
$r = R : M$ — приведенная линейризованная сила трения, которая при стационарном колебательном процессе зависит только от максимальной скорости колебаний и не зависит от времени.

Знаком «+» надо пользоваться в случае отрицательной скорости колебаний ($\dot{y} < 0$), а знаком «-» в случае положительной скорости ($\dot{y} > 0$).

Для второго случая линеаризации (фиг. 4) линеаризованная сила трения скольжения выражается в следующем виде:

$$R = R_0 + cv = R_0 + c\dot{y}. \quad (3)$$

Величина c характеризует наклон прямых AB , AB_1 (фиг. 4) и при стационарных колебаниях зависит только от максималь-



Фиг. 4.

ной скорости, а не зависит от времени. Для частных случаев величина может быть положительна, отрицательна или равна нулю.

Дифференциальное уравнение вынужденных колебаний для линеаризованной силы трения (3) имеет следующий вид:

$$\ddot{y} + 2h\dot{y} + k^2y = F(t) \pm r_0, \quad (4)$$

где $2h = c : M$, $r_0 = R_0 : M$.

Для линеаризации, т. е. для определения величин

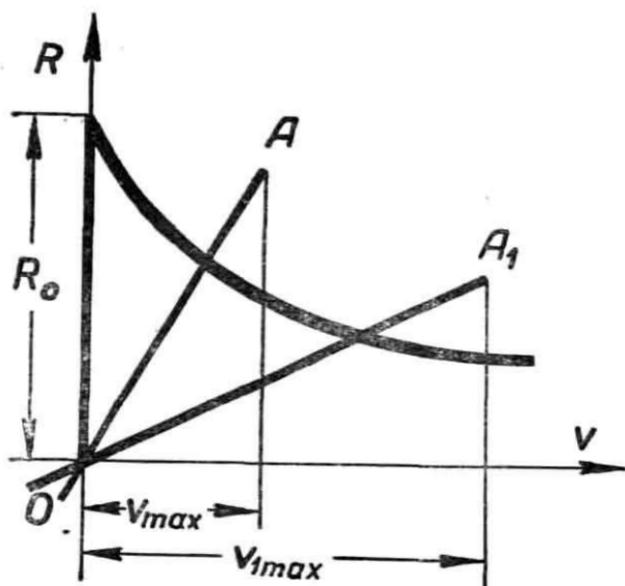
$$R = f_1(v_{\max}), \quad h = f_1'(v_{\max}) \quad (5)$$

принимаются следующие условия:

1) Работы действительной и линеаризованной силы трения за один период одинаковы.

2) При синусоидальной возмущающей силе вынужденные колебания происходят по закону синусоиды. Это приближенное условие.

Более точные результаты получаем при уравнении движения, которое соответствует дифференциальному уравнению (4). Но в таком случае при выполнении первого условия линеаризации при данной силе трения математические выкладки значительно усложняются.



Фиг. 5.

Зная величины R , h (5), можно найти интегралы дифференциальных уравнений (2), (4) и из этих интегралов в свою очередь получаем максимальную скорость как функцию от тех же самых величин R , h , т. е.

$$v_{\max} = f_2(R), \quad v_{\max} = f_2'(h) \quad (6)$$

Кривые (5) и (6) изображаем графически. Точки пересечения кривых (5) с кривыми (6) дают значения величин R , h , которые соответствуют действительному процессу колебаний. Подставляя эти величины в интегралы дифференциальных уравнений (2) и (4), находим все зависимости, характеризующие колебательный процесс.

§ 3. Основные уравнения

а) *Решение дифференциального уравнения (2).*

В настоящей работе рассмотрим только первый вариант линеаризации (фиг. 3). В этом случае вынужденные колебания описываются дифференциальным уравнением (2). Для стационарных колебаний решение этого уравнения при синусоидальной возмущающей силе впервые дано Ден-Гартогом [2]. Это решение можно рассматривать как частный случай общего решения для произвольной возмущающей силы, которое дано автором этой статьи [6].

Итоги этого решения следующие.

Возмущающая сила

$$F(t) = \frac{P}{M} \sin \omega t, \quad (7)$$

где

$$0 < t \leq T.$$

Уравнение движения (фиг. 6)

$$y(t) = \frac{P}{k^2 M} \cdot \left\{ \frac{k^2}{k^2 - \omega^2} \sin \omega t \pm \frac{R}{P} \left[1 - \frac{\cos \frac{k}{\omega} (\omega t - \omega \tau_1 - 0,5\pi)}{\cos \frac{\pi}{2} \frac{k}{\omega}} \right] \right\}, \quad (8)$$

где

$$\tau_1 \leq t \leq \tau_1 + 0,5T.$$

Во второй половине периода перемещения повторяются с обратным знаком.

На фиг. 6 показаны графики синусоидальной возмущающей силы $F(t)$ и колебательного процесса $y(t)$ при предельной линеаризованной силе трения $R : P = 0,784$ и при $\omega : k = 0,75$.

Фаза колебаний

$$\cos \omega \tau_1 = \pm \frac{R}{P} \frac{k^2 - \omega^2}{k\omega} \operatorname{tg} \frac{\pi}{2} \frac{k}{\omega}. \quad (9)$$

Амплитуда колебаний

$$A = \pm \frac{P \sin \omega \tau_1}{M(k^2 - \omega^2)}. \quad (10)$$

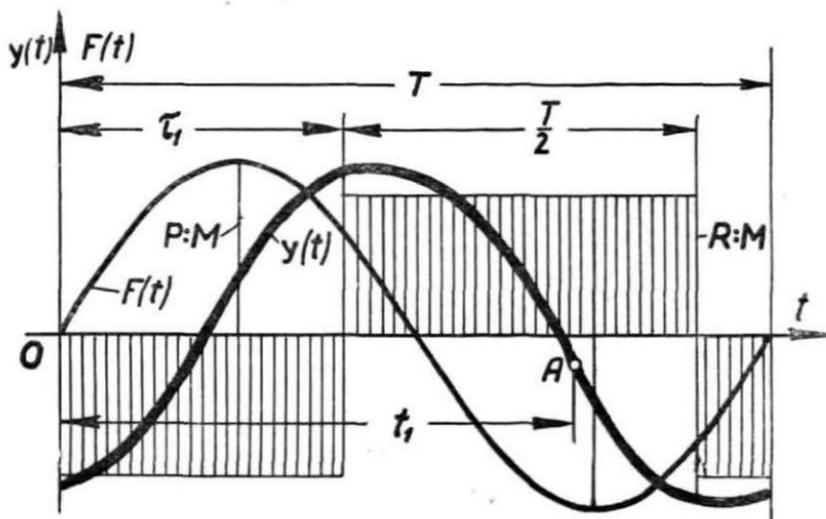
Максимальная скорость колебаний

$$v_{\max} = \frac{P}{kM} \left[\frac{k\omega}{k^2 - \omega^2} \cos \omega t_1 \pm \frac{R}{P} \frac{\sin \frac{k}{\omega} (\omega t_1 - \omega \tau_1 - 0,5\pi)}{\cos \frac{\pi}{2} \frac{k}{\omega}} \right]. \quad (11)$$

Здесь ωt_1 определяется из уравнения

$$\cos \frac{k}{\omega} (\omega t_1 - \omega \tau_1 - 0,5\pi) = \pm \frac{P}{R} \frac{\omega^2}{k^2 - \omega^2} \cos \frac{\pi}{2} \frac{k}{\omega} \sin \omega t_1, \quad (12)$$

которое получено из условия $\ddot{y}(t) = 0$.



Фиг. 6.

Предельная (максимальная) линеаризованная сила трения, при которой уже образуется зона застоя

$$(R:P)_{\text{пр}} = \pm \frac{\omega^2}{k^2 - \omega^2} : \sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{k} \operatorname{tg} \frac{\pi}{2} \frac{k}{\omega} \right)^2}. \quad (13)$$

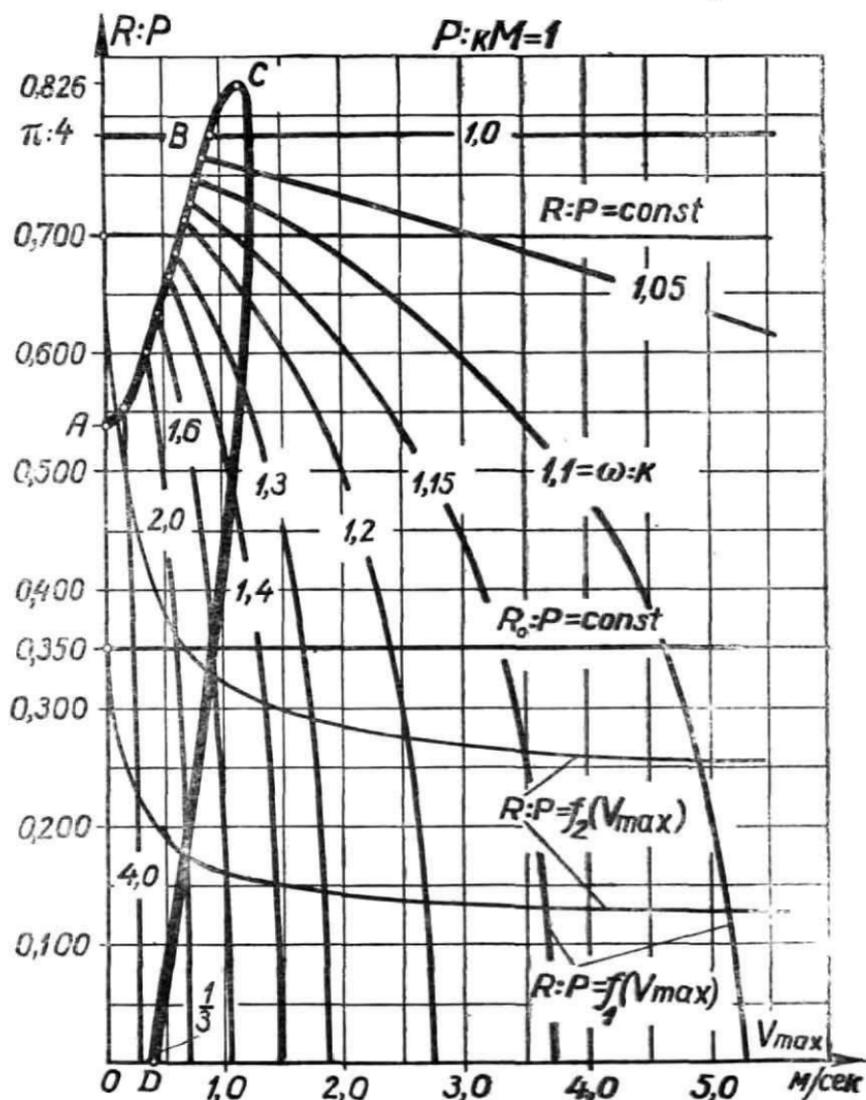
В формулах (8), (9), (10), (11), (12) и (13) знаком «+» надо пользоваться при $k > \omega$, а знаком «-» при $k < \omega$. В упомянутых уравнениях пока неизвестна величина $R:P$, которая зависит от максимальной скорости.

Учитывая уравнения (9) и (12), из уравнения (11) получаем следующую зависимость

$$R:P = f_1(v_{\max}) \quad (14)$$

Графическое отображение уравнения (14) при некоторых значениях величины $\omega : k$ и при $P : kM = 1$ дано на фиг. 7 и 8.

Умножая максимальные скорости, данные в упомянутых фигурах на величину $n = P : kM$, можно получить соответствующие графики $R : P = f_1(v_{\max})$ для любого значения этой величины n . Кривые AB (фиг. 7) и BCD (фиг. 8) определяют мак-

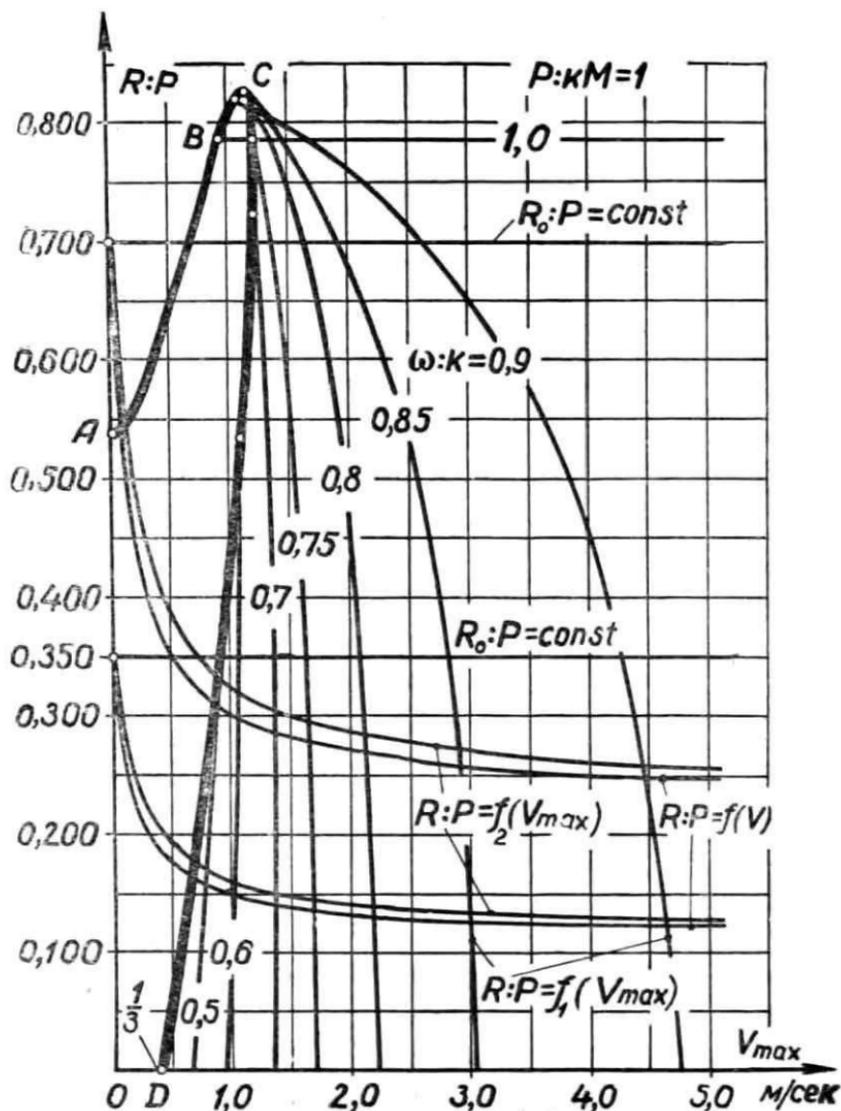


Фиг. 7.

симальные скорости колебаний при предельной линейризованной силе трения (13) в случаях $1 \leq \omega:k \leq \infty$ и $0 \leq \omega:k \leq 1$.

б) *Определение линейризованной силы трения.*

Из условия линейризации (§ 2) можно определить линейризованную силу трения.



Фиг. 8.

1. Работа линеаризованной силы трения.

Линеаризованная сила трения

$$W = R = \text{const.} \quad (\text{не зависит от времени})$$

Уравнение колебаний и скорость колебаний

$$y = A \sin \omega t, \quad \dot{y} = A \omega \cos \omega t = v_{\max} \cos \omega t.$$

Работа силы трения в пределах четверти периода

$$(0 \leq v < v_{\max}).$$

$$U = \int_0^A W dy = \int_0^{\frac{T}{4}} W \dot{y} dt.$$

После интегрирования получаем

$$U = \frac{R v_{\max}}{\omega}.$$

2. Работа действительной силы трения

Если сила трения меняется по закону (1) и колебания происходят по синусоиде, то работа трения имеет следующее значение

$$U_1 = \int_0^A W \dot{y} dt = \\ = \frac{R_0 v_{\max}}{\omega} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{1 + a_1 v_{\max} \cos \omega t + b_1 v_{\max}^2 \cos^2 \omega t}{1 + a_2 v_{\max} \cos \omega t + b_2 v_{\max}^2 \cos^2 \omega t} \cos \omega t d(\omega t).$$

После интегрирования получаем

$$U_1 = \frac{2R_0 v_{\max}}{\omega} \left(\frac{AA_1 - BB_1}{\sqrt{C}} \arctg \sqrt{C_1} + \right. \\ \left. + \frac{BB_1 - AD}{\sqrt{E}} \arctg \sqrt{E_1} + F \right) \\ (\text{При } C > 0; C_1 > 0; E > 0; E_1 > 0);$$

$$U_1 = \frac{2R_0 v_{\max}}{\omega} \left(\frac{AA_1 - BB_1}{\sqrt{-C}} \text{Arth} \sqrt{-C_1} + \right. \\ \left. + \frac{BB_1 - AD}{\sqrt{-E}} \text{Arth} \sqrt{-E_1} + F \right) \\ (\text{При } C < 0; C_1 < 0; E < 0; E_1 < 0);$$

где:

$$A = -1 + \frac{b_1}{b_2} + (a_1 b_2 - a_2 b_1) \frac{a_2 v_{\max} - 1}{b_2^2 v_{\max}},$$

$$B = 1 - \frac{b_1}{b_2} - (a_1 b_2 - a_2 b_1) \frac{a_2 v_{\max} + 1}{b_2^2 v_{\max}},$$

$$C = (b_2 v_{\max}^2 - a_2 v_{\max} + 1)(-b_2 v_{\max}^2 + \sqrt{a_2^2 - 4b_2} v_{\max} + 1),$$

$$A_1 = \frac{1}{2} + \frac{1 - b_2 v_{\max}^2}{2\sqrt{a_2^2 - 4b_2} v_{\max}}, \quad B_1 = \frac{b_2 v_{\max}^2 - a_2 v_{\max} + 1}{2\sqrt{a_2^2 - 4b_2} v_{\max}},$$

$$C_1 = \frac{b_2 v_{\max}^2 - a_2 v_{\max} + 1}{-b_2 v_{\max}^2 + \sqrt{a_2^2 - 4b_2} v_{\max} + 1},$$

$$D = -\frac{1}{2} + \frac{1 - b_2 v_{\max}^2}{2\sqrt{a_2^2 - 4b_2} v_{\max}},$$

$$E = (b_2 v_{\max}^2 - a_2 v_{\max} + 1)(-b_2 v_{\max}^2 - \sqrt{a_2^2 - 4b_2} v_{\max} + 1),$$

$$E_1 = \frac{b_2 v_{\max}^2 - a_2 v_{\max} + 1}{-b_2 v_{\max}^2 - \sqrt{a_2^2 - 4b_2} v_{\max} + 1},$$

$$F = \frac{b_1}{2b_2} + \frac{\pi}{4} \frac{a_1 b_2 - a_2 b_1}{b_2^2 v_{\max}},$$

$$a_2^2 - 4b_2 > 0.$$

Из условия $U = U_1$, получаем относительную линеаризованную силу трения.

$$\frac{R}{P} = \frac{2R_0}{P} \left(\frac{AA_1 - BB_1}{\sqrt{C}} \operatorname{arctg} \sqrt{C_1} + \frac{BB_1 - AD}{\sqrt{E}} \operatorname{arctg} \sqrt{E_1} + F \right) \quad (15)$$

(При $C > 0$; $C_1 > 0$; $E > 0$; $E_1 > 0$);

$$\frac{R}{P} = \frac{2R_0}{P} \left(\frac{AA_1 - BB_1}{\sqrt{-C}} \operatorname{Arth} \sqrt{-C_1} + \frac{BB_1 - AD}{\sqrt{-E}} \operatorname{Arth} \sqrt{-E_1} + F \right) \quad (16)$$

(При $C < 0$; $C_1 < 0$; $E < 0$; $E_1 < 0$).

Если коэффициенты b_1, b_2 равняются нулю, закон трения (1) принимает следующий вид (фиг. 2, кривая 4)

$$R = R_0 \frac{1 + a_1 v}{1 + a_2 v}. \quad (17)$$

Для этой силы трения получаем следующую относительную линейризованную силу трения

$$\frac{R}{P} = \frac{R_0}{P} \left[\frac{a_1}{a_2} + \frac{a_2 - a_1}{a_2^2 v_{\max}} \left(\frac{\pi}{2} - \frac{2}{\sqrt{1 - a_2^2 v_{\max}^2}} \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{1 - a_2 v_{\max}}{1 + a_2 v_{\max}}} \right) \right] \quad (18)$$

(При $a_2 v_{\max} < 1$);

$$\frac{R}{P} = \frac{R_0}{P} \left[\frac{a_1}{a_2} + \frac{a_2 - a_1}{a_2^2 v_{\max}} \left(\frac{\pi}{2} - \frac{2}{\sqrt{a_2^2 v_{\max}^2 - 1}} \operatorname{Arth} \sqrt{\frac{a_2 v_{\max} - 1}{a_2 v_{\max} + 1}} \right) \right] \quad (19)$$

(При $a_2 v_{\max} > 1$).

На фиг. 7 и 8 показаны $R : P = f_2(v_{\max})$ уравнений (18) и (19) при $a_1 = 2$; $a_2 = 6$; $R_0 : P = 0,7$; $R_0 : P = 0,35$. Точка пересечения кривых $R : P = f_1(v_{\max})$ и $R : P = f_2(v_{\max})$ дает соответствующую относительную силу трения $R : P$, при которой происходят колебания. Подставляя значение этой силы в уравнения (8), (9) и (10), получаем уравнение колебаний, фазу и амплитуду колебаний для данной силы трения (1) или (17).

На фиг. 8 показаны также кривые $R : P = f(v)$ уравнения (17) при $a = 2$; $a_2 = 6$; $R_0 : P = 0,35$; $0,7$. Эти кривые мало отличаются от кривых $R : P = f_2(v_{\max})$ и поэтому для упрощения расчетов вместо кривых линейризованной относительной силы трения для первого приближения можно взять кривые $R : P = f(v)$ данной силы трения (1), (17).

Точка пересечения кривых $R : P = f_1(v_{\max})$ и $R : P = f(v)$ дает максимальную скорость v_{\max} . Подставляя эту скорость в соответствующие уравнения (15), (16), (18), (19), получаем второе приближение для линейризованной силы трения $R : P$. Эта сила мало отличается от силы, которую дает точка пересечения кривых $R : P = f_1(v_{\max})$ и $R : P = f_2(v_{\max})$ и ей можно пользоваться для определения колебаний.

в) *Предельная сила трения* для данного закона изменения трения (1), (17).

Зона застоя образуется в мгновения, когда скорость равняется нулю ($t = \tau_1$). В эти мгновения $R = R_0$, $y(\tau_1) = A$, возмущающая сила

$$F(\tau_1) = \frac{P}{M} \sin \omega \tau_1$$

и восстанавливающая сила

$$Q(\tau_1) = k^2 A.$$

Предельная сила трения определяется из условия

$$k^2 A = \pm \frac{P}{M} \sin \omega \tau_1 + \frac{R_0}{M}. \quad (20)$$

Подставляя сюда амплитуду A из формулы (10), получаем

$$(R_0 : P)_{\text{пр}} = \pm \frac{\omega^2}{k^2 - \omega^2} \sin \omega \tau_1. \quad (21)$$

При условии

$$(R_0 : P)_{\text{пр}} < R_0 : P \quad (22)$$

образуются зоны застоя; для таких случаев формулы, данные в этой статье, нельзя применять. Проверку по формуле (22) надо сделать только в таком случае, когда

$$(R : P)_{\text{пр}} < R_0 : P. \quad (23)$$

Применяя полученные формулы и графики (фиг. 7 и 8), можно определить все величины, характеризующие вынужденные колебания при силе трения (1), (17), зависящей от скорости.

Для сравнения результатов определены отношения амплитуд $A_2 : A_1$ в случаях силы трения (17) и силы сухого трения ($R_0 : P = \text{const}$) при следующих данных: $P : kM = 1$; $a_1 = 2$; $a_2 = 6$; $R_0 : P = 0,35$; $0,70$.

Таблица 1.

$R_0 : P$	$\omega : k$	0,60	0,70	0,80	0,85	0,90	1,00	1,10	1,15	1,20	2,00	∞
0,35	$A_2 : A_1$	1,02	1,04	1,07	1,08	1,09	1,10	1,11	1,12	1,12	1,13	1,00
0,70	$A_2 : A_1$	—	1,25	1,47	1,60	1,70	2,11	2,55	2,82	3,23	—	—

Результаты (таблица 1) показывают, что на отношение амплитуд $A_2 : A_1$ сильно влияет максимальное значение силы трения $R_0 : P$. При малых значениях $R_0 : P$ амплитуды A_2, A_1 мало отличаются, а при больших — отличие значительно увеличивается.

Для рассмотренных случаев $R_0 : P$ меньше предельной силы (13) и проверка по формуле (22) не нужна.

При $P : kM > 1$ отношение амплитуд $A_2 : A_1$ будет больше, а при $P : kM < 1$ — меньше, чем показано в таблице 1.

ЛИТЕРАТУРА

1. Б. В. Булгаков. Колебания. Гостехиздат, 1954.
 2. I. P. Den Hartog. Forced vibrations with combined viscous and coulomb damping. Verh. Internat. Kongr. Techn. Mechanik, Stockholm, 1930.
 3. H. Ziegler. Erzwungene Schwingungen mit konstanter Dämpfung. Ingenieur-Archiv, Bd. IX, Heft 3, 1938.
 4. W. Szablewski. Einfluss der Coulombschen Reibung auf Schwingungsvorgänge. Math. Nachr. 12, Nr. 3/4, 1954.
 5. R. Reissig. Erzwungene Schwingungen mit zäher und trockener Reibung. Math. Nachr. 11, 1954.
 6. Вопросы динамики и динамической прочности. Сборник статей. Выпуск IV. Издательство АН Латв. ССР, 1956.
 7. И. В. Крагельский и И. Э. Виноградов. Коэффициенты трения. Машгиз, 1955.
-

Е. Б. ВАСЕРМАН, кандидат технических наук

ОБЗОР СПОСОБОВ, ДАЮЩИХ ДВУСТОРОННИЕ ОЦЕНКИ СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ КОЛЕБАНИЙ УПРУГИХ СИСТЕМ

Введение

Как известно, методы, дающие двусторонние оценки собственных частот, выгодно отличаются тем, что позволяют с любой точностью установить как верхнюю так и нижнюю границу для частоты основного тона свободных колебаний.

С. А. Бернштейн, опубликовавший в 1939 г. метод спектральной функции, писал ([1] стр. 47): «Насколько нам известно, ни один из современных приближенных способов исчисления частот не обладает свойством двусторонней аппроксимации».

Ниже приводятся три других метода, обладающих тем же свойством (два метода были опубликованы ранее работы С. А. Бернштейна и один одновременно с ней) и дается сопоставление всех четырех методов. Для удобства сравнения мы стремились все формулы излагаемых методов привести к подобному виду и к одним и тем же обозначениям.

§ 1. Метод ван ден Дунгена

В 1928 г. ван ден Дунген опубликовал работу [2], в которой рассмотрены свободные изгибные колебания вала и дан метод определения частот, как основного, так и высших тонов. Мы остановимся лишь на определении низшей частоты, как наиболее важной для практических расчетов.

1. 1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НИЖНЕЙ ОЦЕНКИ

Для нижней оценки основной частоты свободных колебаний ван ден Дунген использовал неравенство:

$$\frac{1}{\sqrt{B_n}} < Z_1, \quad (1.01)$$

где

$$B_n = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{Z_k^n} \underbrace{\int_0^l \int_0^l \dots \int_0^l m(x_1) \dots m(x_n) \delta_{12} \delta_{23} \dots \delta_{n1}}_n \cdot dx_1 \dots dx_n. \quad (1.02)$$

Здесь обозначено:

- $x_1 \dots x_n$ — координаты соответствующих сечений;
- z_1 — квадрат низшей частоты свободных колебаний;
- $m(x_1) \dots$
 $\dots m(x_n)$ — интенсивности массы стержня в соответствующих сечениях;
- δ_{ik} — перемещение точки с координатой x_i при приложении единичной силы в точке с координатой x_k ;
- n — номер приближения.

Ясно, что чем выше будет взят номер n , тем точнее будет полученный результат квадрата частоты.

При $n=1$ имеем:

$$\frac{1}{B_1} < Z_1, \quad (1.03)$$

где

$$B_1 = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{Z_k} = \int_0^l m(x) \delta_{xx} dx. \quad (1.04)$$

Выражение (1.03) представляет собой экспериментально найденную в 1895 году формулу Донкерли.

Полагая в (1.02) последовательно $n=2$ и $n=3$ получим:

$$\left. \begin{aligned} B_2 &= \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{Z_k^2} = \int_0^l \int_0^l m(x_1) m(x_2) \delta_{12}^2 dx_1 dx_2; \\ B_3 &= \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{Z_k^3} = \int_0^l \int_0^l \int_0^l m(x_1) m(x_2) m(x_3) \delta_{12} \delta_{23} \delta_{31} dx_1 dx_2 dx_3 \end{aligned} \right\} (1.05)$$

Формула (1.01) не является новой и была дана в работе Греффе [3]; Греффе применил эту формулу для определения первого корня алгебраических уравнений высших степеней.

1. 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕРХНЕЙ ОЦЕНКИ.

Для верхней оценки основной частоты ван ден Дунген предложил неравенства:

$$z_1 < q_n < p_n,$$

где

$$q_n = \frac{\int_0^l m(x) y_{nx} y_{n-1x} dx}{\int_0^l m(x) y_{nx}^2 dx}; \quad (1.06)$$

$$p_n = \frac{\int_0^l m(x) y_{n-1x}^2 dx}{\int_0^l m(x) y_{nx} y_{n-1x} dx}. \quad (1.07)$$

Здесь

y_{0x} — произвольно выбранный прогиб, а y_{1x} , y_{2x} ,
 \dots , y_{n-1x} , y_{nx} — последовательность прогибов, вычисляемых по рекуррентной формуле

$$y_{ns} = \int_0^l \delta_{sx} m(x) y_{n-1x} dx \quad (1.08)$$

где

n — число вычисляемых приближений (итераций);
 x и s — координаты соответствующих сечений.

Хотя неравенство (1.06) и дает более точное значение верхнего предела для z_1 , однако в некоторых случаях удобнее вести вычисления по неравенству (1.07), по которому можно иногда и не образовывать предварительно итерированные значения y_{ns} (см. [4] стр. 297).

Неравенства (1.06) и (1.07) при удачном выборе первого приближения для прогиба y_{0x} дают достаточную точность уже при $n=2$ и очень часто даже при $n=1$.

§ 2. Метод П. Ф. Папковича

В 1933 г. П. Ф. Папкович опубликовал статью [5], в которой указан метод определения отдельных корней характеристического определителя и соответствующие им собственные решения системы линейных уравнений. Полученные им соотношения позволяют установить для наибольшего характеристического числа, и следовательно для наименьшей частоты свободных колебаний определенные пределы.

Пусть точное уравнение частот упругой многомассовой системы с k степенями свободы имеет вид:

$$A - \lambda E = \begin{vmatrix} m_1 \delta_{11} z - 1, & m_2 \delta_{12} z, & \dots & m_k \delta_{1k} z \\ m_1 \delta_{21} z, & m_2 \delta_{22} z - 1, & \dots & m_k \delta_{2k} z \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ m_1 \delta_{k1} z, & m_2 \delta_{k2} z, & \dots & m_k \delta_{kk} z - 1 \end{vmatrix} = 0 \quad (2.01)$$

Тогда матрицей A этого векового уравнения является:

$$A = \begin{vmatrix} m_1 \delta_{11}, & m_2 \delta_{12}, & \dots & m_k \delta_{1k} \\ m_1 \delta_{21}, & m_2 \delta_{22}, & \dots & m_k \delta_{2k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ m_1 \delta_{k1}, & m_2 \delta_{k2}, & \dots & m_k \delta_{kk} \end{vmatrix} \quad (2.02)$$

Последовательным перемножением матрицы самой на себя составим четные степени этой матрицы т. е.

$$A^2, A^4, A^8, A^{16} \dots$$

Обозначим след матрицы A через B_1 , след матрицы $A^2 = A \cdot A$ через B_2 , след матрицы $A^4 = A^2 \cdot A^2$ через B_4 и т. д.

Сопоставляя получаемые выражения следов матриц B_n со значениями коэффициентов B_n , входящих в формулу ван ден Дунгена (1.01) и вычисляемых из (1.02) при переходе на конечное число степеней свободы, замечаем их полное совпадение.

Таким образом соотношения полученные П. Ф. Папковичем могут быть написаны в следующем виде:

$$\frac{1}{B_1} < Z_1 \quad (2.03)$$

$$\frac{1}{\sqrt{B_2}} < Z_1 < \frac{B_1}{B_2} \quad (2.04)$$

$$\frac{1}{4\sqrt{B_4}} < Z_1 < \sqrt{\frac{B_2}{B_4}} \quad (2.05)$$

.....

$$\frac{1}{\sqrt{\frac{n}{B_n}}} < Z_1 < \sqrt{\frac{B_{n/2}}{B_n}} \quad (2.06)$$

Получаемые границы при увеличении номера n все более и более сближаются и позволяют вычислить квадрат нижней частоты — z_1 с любой желаемой степенью точности.

§ 3. Метод Е. М. Майзеля

В 1939 г. Е. М. Майзель опубликовал работу [6], в которой также дан метод двусторонней оценки квадрата нижней частоты свободных колебаний многомассовой системы с k степенями свободы.

3. 1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕРХНЕГО ПРЕДЕЛА.

Для определения верхнего предела Е. М. Майзель предлагает решать вместо векового уравнения (2.01) квадратное уравнение, получаемое из векового путем вычеркивания из (2.01) $k-2$ нижних строк и $k-2$ правых столбцов. Если учесть, что сумма обратных величин корней квадратного уравнения равна следу квадратной матрицы, а их произведение — определителю матрицы, нетрудно получить верхний предел нижней частоты z_1^g т. е. меньший корень квадратного уравнения в следующем виде:

$$Z_1^g = \frac{2}{(m_1\delta_{11} + m_2\delta_{22}) + \sqrt{(m_1\delta_{11} - m_2\delta_{22})^2 + 4m_1m_2\delta_{12}^2}} \quad (3.01)$$

Обозначая след матрицы квадратного уравнения через A_1 , а следы матриц получаемых из этой исходной возведением ее в степень n через A_{1n} окончательно получим для первого приближения сверху

$$Z_1^g = \frac{2}{A_1 + \sqrt{2A_{12} - A_1^2}} \quad (3.02)$$

Для получения последующих приближений необходимо образовывать вековые уравнения, все корни которых равны

корням исходного векового уравнения (2.01) в степени n (Е. М. Майзель рекомендует брать $n=2^m$, где $m=0, 1, 2, 3, \dots$). Так для второго приближения $n=2$ возводим в квадрат матрицу (2.02), зачеркиваем как и ранее $k-2$ строк и $k-2$ столбцов и обозначая след полученной квадратной матрицы через A_2 , а след матрицы полученной из этой квадратной матрицы возведением ее в квадрат через A_{22} аналогично получим, решая квадратное уравнение:

$$Z_1^2 = \sqrt{\frac{2}{A_2 + \sqrt{2A_{22} - A_2^2}}} \quad (3.03)$$

В общем виде, когда корни нового векового уравнения равны корням исходного уравнения (2.01) в степени n , имеем:

$$Z_1^n = \sqrt[n]{\frac{2}{A_n + \sqrt{2A_{n^2} - A_n^2}}} \quad (3.04)$$

Е. М. Майзель отмечает, что не обязательно зачеркивать $k-2$ нижних строк и $k-2$ правых столбцов, а желательно производить зачеркивание таким образом, чтобы для Z_1^n т. е. меньшего корня квадратного уравнения получилось бы наименьшее значение.

3. 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НИЖНЕГО ПРЕДЕЛА.

Ван ден Дунген, П. Ф. Папкович, а затем и С. А. Бернштейн находят нижний предел основной частоты исходя из того, что обратная величина квадрата низшей частоты взятая в степени n всегда меньше следа соответствующей матрицы, полученной из основной также возведением в степень n .

Е. М. Майзель уточняет эти выражения тем, что он от следа соответствующих матриц вычитает обратную величину второго (большого) корня квадратного уравнения возведенную в степень n т. е. величину $\left(\frac{1}{Z_2^n}\right)^n$; так как этот корень получается с избытком, то неравенство не нарушается.

В результате можно получить следующие выражения для нижнего предела Z_1^n
При $n=1$

$$Z_1^n = Z_1^2 \cdot \frac{1}{1 + Z_1^2 \cdot (B_1 - A_1)}; \quad (3.05)$$

При $n=2$

$$Z_1^n = Z_1^0 \cdot \sqrt{\frac{1}{1 + (Z_1^0)^2 \cdot (B_2 - A_2)}}; \quad (3.06)$$

или в общем виде

$$Z_1^n = Z_1^0 \cdot \sqrt[n]{\frac{1}{1 + (Z_1^0)^n \cdot (B_n - A_n)}}. \quad (3.07)$$

§ 4. Метод С. А. Бернштейна

Суть метода С. А. Бернштейна основан на следующих свойствах развернутого полинома векового уравнения:

а) все коэффициенты полинома являются положительными и быстро убывающими.

б) полином, в случае системы с бесконечным числом степеней свободы, является абсолютно сходящимся рядом. Это дает возможность для приближенного вычисления корней характеристического полинома ограничиться лишь несколькими членами полинома.

Чтобы уменьшить ошибку от отбрасывания членов, характеристический полином заменяется новым, трансформированным полиномом, корни которого равняются корням характеристического полинома в степени n (где $n > 1$).

Для определения частоты основного тона С. А. Бернштейн ограничивается для заниженного значения двумя членами, а для завышенного значения тремя членами трансформированного полинома.

В результате он получает следующие неравенства:

$$\frac{1}{\sqrt[n]{B_n}} < Z_1 < \sqrt[n]{\frac{2}{B_n + \sqrt{2B_{2n} - B_n^2}}} \quad (4.01)$$

С. А. Бернштейн рекомендует ограничиться для заниженного значения основного тона числом $n=2$, а для завышенного значения числом $n=1$.

Таким образом им получено:

$$\frac{1}{\sqrt{B_2}} < Z_1 < \frac{2}{B_1 + \sqrt{2B_2 - B_1^2}} \quad (4.02)$$

Числа B_n для систем с конечным числом степеней свободы имеют вид:

$$\begin{aligned}
B_1 &= \sum_{i=1}^k m_i \delta_{ii} \\
B_2 &= \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k m_i m_j \delta_{ij}^2 \\
B_3 &= \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \sum_{p=1}^k m_i m_j m_p \delta_{ij} \delta_{jp} \delta_{pi} \\
&\dots \\
&\dots
\end{aligned} \tag{4.03}$$

Эти формулы С. А. Бернштейн дает еще в следующем развернутом виде:

$$\begin{aligned}
B_2 &= \sum_{i=1}^k m_i \delta_{ii}^2 + 2 \sum_{i < j} m_i m_j \delta_{ij}^2 \\
B_3 &= \sum_{i=1}^k m_i^3 \delta_{ii}^3 + 3 \sum_{i \neq j} m_i^2 m_j \delta_{ii} \delta_{ij}^2 + \\
&\quad + 6 \sum_{i < j < p} m_i m_j m_p \delta_{ij} \delta_{jp} \delta_{pi} \\
B_4 &= \sum_{i=1}^k m_i^4 \delta_{ii}^4 + 4 \sum_{i \neq j} m_i^3 m_j \delta_{ii}^2 \delta_{ij}^2 + \\
&\quad + 4 \sum_{i < j} m_i^2 m_j^2 \delta_{ii} \delta_{jj} \delta_{ij}^2 + 2 \sum_{i < j} m_i^2 m_j^2 \delta_{ij}^4 + \\
&\quad + 8 \sum_{i \neq j \neq p \neq i} m_i^2 m_j m_p \delta_{ii} \delta_{ij} \delta_{jp} \delta_{pi} + \\
&\quad + 4 \sum_{i \neq j \neq p \neq i} m_i^2 m_j m_p \delta_{ij}^2 \delta_{ip}^2 + \\
&\quad + 24 \sum_{i < j < p < t} m_i m_j m_p m_t \delta_{ij} \delta_{jp} \delta_{pt} \delta_{ti} \\
&\dots \\
&\dots
\end{aligned} \tag{4.04}$$

С. А. Бернштейн отметил, что полученные выражения для низшего предела квадрата основной частоты справедливы лишь в том случае, если низшая частота не является кратной.

Как показано С. А. Бернштейном это имеет место лишь тогда, когда

$$2 B_2 \geq B_1^2$$

Если же $2 B_2 < B_1^2$ возможна кратность частот и необходимо сделать поверку при помощи специально разработанной для этой цели последовательности чисел (см. [1] стр. 66).

В случае кратной первой частоты ее нижний предел вычисляется по формуле

$$\sqrt[n]{\frac{r}{B_n}} < Z_1 \quad (n = 1, 2, 3 \dots)$$

где r показатель кратности первой частоты.

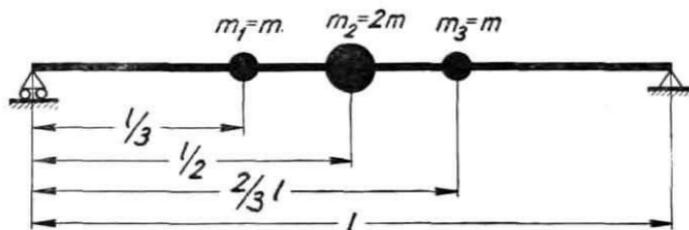
Что касается верхнего предела квадрата основной частоты, то он в случае кратных корней вычисляется по тем же формулам, как и в случае отсутствия кратных корней.

§ 5. Численные примеры

Для сопоставления объема вычислений по приведенным четырем двусторонним методам и сравнения точности получаемых результатов ниже приводятся два численных примера.

5. 1. ПРИМЕР № 1 ([7] стр. 225).

Определить основную частоту колебаний балки постоянного сечения, лежащей на двух опорах (фиг. 1) с тремя закрепленными на ней грузами ($m_1 = m_3 = m$ $m_2 = 2m$).



Фиг. 1.

Собственной массой балки можно пренебречь. Определяем коэффициенты влияния:

$$\delta_{11} = \delta_{33} = 64 \alpha$$

$$\delta_{22} = 81 \alpha$$

$$\delta_{12} = \delta_{23} = 69 \alpha$$

$$\delta_{13} = 56 \alpha$$

где

$$\alpha = \frac{l^3}{3888 EJ}$$

Вычисляем значения чисел B_1, B_2, B_3, B_4 .

Это можно сделать двумя способами:

1) по формулам ван ден Дунгена или развернутым формулам С. А. Бернштейна.

2) по общему правилу умножения числовых матриц, как это делает П. Ф. Папкович.

1) Вычисление чисел B_n первым способом:

$$B_1 = m_1 \delta_{11} + m_2 \delta_{22} + m_3 \delta_{33} = 290 m \alpha$$

$$B_2 = m_1^2 \delta_{11}^2 + m_2^2 \delta_{22}^2 + m_3^2 \delta_{33}^2 + 2 (m_1 m_2 \delta_{12}^2 + m_2 m_3 \delta_{23}^2 + m_1 m_3 \delta_{13}^2) = 78796 m^2 \alpha^2$$

$$B_3 = m_1^3 \delta_{11}^3 + m_2^3 \delta_{22}^3 + m_3^3 \delta_{33}^3 + 3 [m_1^2 m_2 \delta_{11} \delta_{12}^2 + m_1^2 m_3 \delta_{11} \delta_{13}^2 + m_2^2 m_3 \delta_{22} \delta_{23}^2 + m_2^2 m_1 \delta_{22} \delta_{21}^2 + m_3^2 m_1 \delta_{33} \delta_{31}^2 + m_3^2 m_2 \delta_{33} \delta_{32}^2] + 6 m_1 m_2 m_3 \delta_{12} \delta_{23} \delta_{31} = 22091264 m^3 \alpha^3$$

$$B_4 = m_1^4 \delta_{11}^4 + m_2^4 \delta_{22}^4 + m_3^4 \delta_{33}^4 + 4 [m_1^3 m_2 \delta_{11}^2 \delta_{12}^2 + m_1^3 m_3 \delta_{11}^2 \delta_{13}^2 + m_2^3 m_3 \delta_{22}^2 \delta_{23}^2 + m_2^3 m_1 \delta_{22}^2 \delta_{21}^2 + m_3^3 m_1 \delta_{33}^2 \delta_{31}^2 + m_3^3 m_2 \delta_{33}^2 \delta_{32}^2] + 4 [m_1^2 m_2^2 \delta_{11} \delta_{22} \delta_{12}^2 + m_2^2 m_3^2 \delta_{22} \delta_{33} \delta_{23}^2 + m_3^2 m_1^2 \delta_{33} \delta_{11} \delta_{31}^2] + 2 [m_1^2 m_2^2 \delta_{12}^4 + m_2^2 m_3^2 \delta_{23}^4 + m_3^2 m_1^2 \delta_{31}^4] + 8 [m_1^2 m_2 m_3 \delta_{11} \delta_{12} \delta_{23} \delta_{31} + m_2^2 m_3 m_1 \delta_{22} \delta_{23} \delta_{31} \delta_{12} + m_3^2 m_1 m_2 \delta_{33} \delta_{31} \delta_{12} \delta_{23}] + 4 [m_1^2 m_2 m_3 \delta_{12}^2 \delta_{13}^2 + m_2^2 m_3 m_1 \delta_{23}^2 \delta_{21}^2 + m_3^2 m_1 m_2 \delta_{31}^2 \delta_{32}^2] = 6198418288 m^4 \alpha^4$$

2) Вычисление чисел B_n вторым способом.

Значения чисел B_n в особенности при больших значениях номера n оказывается проще вычислять вторым способом.

В нашем случае имеем:

$$A = \begin{pmatrix} m_1 \delta_{11} & m_2 \delta_{12} & m_3 \delta_{13} \\ m_1 \delta_{21} & m_2 \delta_{22} & m_3 \delta_{23} \\ m_1 \delta_{31} & m_2 \delta_{32} & m_3 \delta_{33} \end{pmatrix} = m \alpha \begin{pmatrix} 64 & 138 & 56 \\ 69 & 162 & 69 \\ 56 & 138 & 64 \end{pmatrix} \quad (5.01)$$

откуда $B_1 = (64 + 162 + 64) m \alpha = 290 m \alpha$.

Возводим исходную матрицу в квадрат:

$$A^2 = m^2 \alpha^2 \begin{pmatrix} 16754 & 38916 & 16690 \\ 19458 & 45288 & 19458 \\ 16690 & 38916 & 16754 \end{pmatrix} \quad (5.02)$$

откуда $B_2 = 78796 m^2 \alpha^2$.

$$A^3 = m^3 \alpha^3 \begin{pmatrix} 4692100 & \dots & \dots \\ \dots & 12707064 & \dots \\ \dots & \dots & 4692100 \end{pmatrix} \quad (5.03)$$

Здесь вычислены лишь необходимые нам элементы диагональной строки матрицы, из которой получаем:

$$B_3 = 22091264 m^3 \alpha^3.$$

Далее аналогично вычисляем:

$$A^4 = A^2 A^2 = m^4 \alpha^4 \begin{pmatrix} 1316480144 & \dots & \dots \\ \dots & 3565458000 & \dots \\ \dots & \dots & 1316480144 \end{pmatrix} \quad (5.04)$$

Откуда имеем:

$$B_4 = 6\,198\,418\,288 m^4 \alpha^4$$

5. 1. 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НИЗШЕГО ПРЕДЕЛА КВАДРАТА ОСНОВНОЙ ЧАСТОТЫ КОЛЕБАНИИ

Как видно нижний предел основной частоты определяется ван ден Дунгеном, П. Ф. Папковичем и С. А. Бернштейном по одной и той же формуле (1.01). При этом ван ден Дунген и

С. А. Бернштейн вычисляют числа B_n при помощи формул, а П. Ф. Папкович пользуется правилом возведения в квадрат матриц. Кроме того ван ден Дунген и С. А. Бернштейн для n берут последовательность чисел 1, 2, 3..., а П. Ф. Папкович — $n=2^m$ где $m=0,1,2,3\dots$

Очевидно, что эти различия несущественны и следует признать, что формула для определения нижнего предела основной частоты у трех упомянутых авторов полностью совпадает. Подставляя в (1.01) значения α и B_n вычисляем при $n=1, 2, 3$ и 4 нижний предел квадрата основной частоты и результаты вычислений помещаем ниже в таблицу 1.

Определение нижнего предела основной частоты методом Е. М. Майзеля возможно только после предварительного вычисления верхнего предела той же частоты.

Зачеркивая в матрице (5.01) нижнюю строку и правый столбец получаем квадратную матрицу. Вычисляя затем по формуле (3.01) или (3.02) и подставляя сюда значение α имеем первое приближение для верхнего предела:

$$Z_1^e = 17,4985 \frac{EJ}{mI^3}$$

Подставляя значение z_1^e в формулу (3.05) имеем первое приближение для нижнего предела.

$$Z_1^k = 13,5854 \frac{EJ}{mI^3}$$

Для получения второго приближения вычеркиваем в матрице (5.02) нижнюю строку и правый столбец и поступая аналогично предыдущему имеем:

$$\text{второе приближение верхнего предела } Z_1^e = 15,6126 \frac{EJ}{mI^3}$$

$$\text{и второе приближение нижнего предела } Z_1^k = 13,8528 \frac{EJ}{mI^3}$$

5. 1. 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕРХНЕГО ПРЕДЕЛА

Следуя ван ден Дунгену примем

$$y_{ox} = g \quad (g = 9,81 \text{ м/сек}^2),$$

что можно делать лишь в том случае, если все массы одновременно колеблются в одну сторону. Вычислим ряд прогибов по формуле (1.08) видоизмененной для системы с тремя степенями свободы. Тогда для первого приближения $n=1$ вместо (1.08) имеем:

$$y_{1s} = \sum_{x=1}^3 m_x \delta_{sx} y_{ox} = g \sum_{x=1}^3 m_x \delta_{sx} \quad (5.05)$$

Это равносильно предположению, что y_{1s} представляет собой статический прогиб в сечении s под действием всех нагрузок $m_x g$. Такое обычное предположение оказывается достаточно точным.

Обозначая сумму элементов первой строки матрицы (5.01) через H_1 , второй строки — H_2 , третьей строки — H_3 и полагая в выражении (5.05) последовательно $s=1, 2, 3$ получаем:

$$y_{11} = gH_1 = 258 \text{ } mg\alpha$$

$$y_{12} = gH_2 = 300 \text{ } mg\alpha$$

$$y_{13} = gH_3 = 258 \text{ } mg\alpha$$

Теперь формула (1.07) принимает вид:

$$p_1 = \frac{\sum_{x=1}^3 m_x y_{ox}^2}{\sum_{x=1}^3 m_x y_{1x} y_{ox}} = g \frac{\sum_{x=1}^3 m_x}{\sum_{x=1}^3 m_x y_{1x}} \quad 1) \quad (5.06)$$

Подставляя сюда данные значения m_x и вычисленные величины y_{1s} и α , получаем:

$$p_1 = 13,9355 \frac{EJ}{m l^3}$$

Формула (1.06) принимает аналогичный вид:

$$q_1 = \frac{\sum_{x=1}^3 m_x y_{1x} y_{ox}}{\sum_{x=1}^3 m_x y_{1x}^2} = g \frac{\sum_{x=1}^3 m_x y_{1x}}{\sum_{x=1}^3 m_x y_{1x}^2} \quad 2) \quad (5.07)$$

Подставляя сюда значения m_x, y_{1x} и α имеем:

$$q_1 = 13,8570 \frac{EJ}{m l^3}$$

¹⁾ Такую же формулу другим путем получил в 1922 году Р. Граммель ([8] стр. 98) для определения критических угловых скоростей вала с несколькими дисками.

²⁾ Эта же формула получена в 1918 году Г. Куллем ([9] стр. 249) для определения критических угловых скоростей вала и в 1922 году Р. Граммелем ([5] стр. 99), дополнившим ее учетом гироскопического эффекта.

Второе приближение получим из (1.08) принимая $n=2$

$$y_{2s} = \sum_{x=1}^3 m_x \delta_{sx} y_{1x} \quad (5.08)$$

Обозначая сумму элементов первой строки матрицы (5.02) через H_1^2 , второй строки — H_2^2 , третьей строки — H_3^2 и полагая в (5.08) последовательно $s=1, 2, 3$ получаем:

$$y_{21} = gH_1^2 = 72360 \text{ м}^2 g \alpha^2$$

$$y_{22} = gH_2^2 = 84204 \text{ м}^2 g \alpha^2$$

$$y_{23} = gH_3^2 = 72360 \text{ м}^2 g \alpha^2$$

Подставляя эти значения в (1.06) имеем:

$$q_2 = \frac{\sum m_x y_{1x} y_{2x}}{\sum m_x y_{2x}^2} = 13,8566 \frac{EJ}{m l^3}$$

Пользуясь методом П. Ф. Папковича получаем для верхнего предела основной частоты:

$$\text{в первом приближении по формуле (2.04) } Z_1 < 14,3084 \frac{EJ}{m l^3}$$

$$\text{и во втором приближении по формуле (2.05) } Z_1 < 13,8624 \frac{EJ}{m l^3}$$

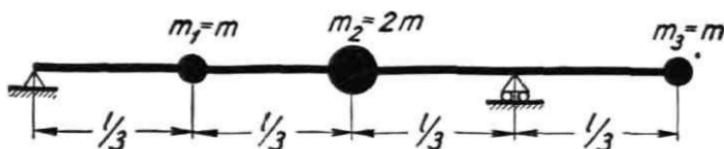
Пользуясь методом С. А. Бернштейна и подставляя значения чисел B_n в правую часть неравенства (4.01) получаем:

$$\text{при } n=1 \quad Z_1 < 13,8586 \frac{EJ}{m l^3}$$

$$\text{при } n=2 \quad Z_1 < 13,8566 \frac{EJ}{m l^3}$$

5. 2. ПРИМЕР № 2. КОНСОЛЬНАЯ БАЛКА ([1] стр. 84).

Определить частоту основного тона свободных колебаний одноконсольной балки (фиг. 2), загруженной согласно чертежу тремя массами: $m_1 = m$; $m_2 = 2m$; $m_3 = m$.



Фиг. 2.

5. 2. 1. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ.

Определяем коэффициенты влияния:

$$\begin{aligned}\delta_{11} &= \delta_{22} = 8\alpha \\ \delta_{12} &= 7\alpha \\ \delta_{33} &= 24\alpha \\ \delta_{13} &= -8\alpha \\ \delta_{23} &= -10\alpha\end{aligned}$$

где

$$\alpha = \frac{l^3}{486EJ}$$

Вычисляем значения чисел B_n ; составляем матрицу:

$$A = m\alpha \begin{vmatrix} 8 & 14 & -8 \\ 7 & 16 & -10 \\ -8 & -20 & 24 \end{vmatrix} \quad (5.09)$$

Откуда $B_1 = 48 m\alpha$

Возводя матрицу (5.09) в квадрат имеем:

$$A^2 = m^2\alpha^2 \begin{vmatrix} 226 & 496 & -396 \\ 248 & 554 & -456 \\ -396 & -912 & 840 \end{vmatrix} \quad (5.10)$$

откуда $B_2 = 1620 m^2\alpha^2$

Аналогично, вычисляя лишь элементы диагональных строк матриц A^3 и A^4 имеем:

$$B_3 = (8448 + 21456 + 32448)m^3\alpha^3 = 62352 m^3\alpha^3$$

$$B_4 = (330900 + 845796 + 1278288)m^4\alpha^4 = 2454984 m^4\alpha^4$$

5. 2. 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НИЗШЕГО ПРЕДЕЛА КВАДРАТА ОСНОВНОЙ ЧАСТОТЫ КОЛЕБАНИЙ.

Подставляя в (1.01) значения B_n и α и принимая последовательно $n=1, 2, 3, 4$ получаем значения нижнего предела квадрата основной частоты методом ван ден Дунгена, П. Ф. Папковича и С. А. Бернштейна. Результаты вычислений сведены в таблицу 1.

Для определения того же предела методом Е. М. Майзеля зачеркиваем в матрице (5.09) нижнюю строку и правый столбец. Вычисляя по формуле (3.01) или (3.02) получаем:

$$Z_1^g = 21,4313 \frac{EJ}{ml^3}$$

Это значение z_1^g можно значительно снизить, если меняем местами первую и третью строку, а также первый и третий столбцы матриц (5.09). Тогда получаем

$$Z_1^g = 14,0070 \frac{EJ}{ml^3}$$

Подставляя последнее значение z_1^g в (3.05) получаем первое приближение нижнего предела

$$Z_1^h = 11,3825 \frac{EJ}{ml^3}$$

Для получения второго приближения меняем местами первую и третью строки, а также первый и третий столбцы матрицы (5.10), решая аналогично предыдущему получаем:

$$Z_1^g = 13,1904 \frac{EJ}{ml^3}$$

$$Z_1^h = 12,2129 \frac{EJ}{ml^3}$$

5. 2. 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕРХНЕГО ПРЕДЕЛА

Пользуясь методом ван ден Дунгена и учитывая, что в этом случае массы колеблются в противоположные стороны, принимаем

$$y_{ox} = \pm g,$$

причем верхний знак возьмем для масс, находящихся между опорами, и нижний знак — для массы на консоли. Тогда вместо (1.08) для $n=1$ имеем:

$$y_{1s} = g(m_1 \delta_{s1} + m_2 \delta_{s2} - m_3 \delta_{s3})$$

Здесь y_{1s} представляет собой не статический прогиб, а разницу прогибов от положительных нагрузок в пролете и отрицательной нагрузки на консоли.

Принимая последовательно $s=1, 2, 3$ имеем:

$$y_{11}=30 \text{ } mg\alpha; \quad y_{12}=33 \text{ } mg\alpha; \quad y_{13}=-52 \text{ } mg\alpha.$$

Формула (1.07) принимает вид:

$$p_1 = g \frac{m_1 + m_2 + m_3}{m_1 y_{11} + m_2 y_{12} - m_3 y_{13}} \quad (5.11)$$

Подставляя сюда значения m_x, y_{1s} и α получаем:

$$p_1 = 13,1351 \frac{EJ}{m l^3}$$

Аналогично формула (1.06) принимает вид:

$$q_1 = g \frac{m_1 y_{11} + m_2 y_{12} - m_3 y_{13}}{m_1 y_{11}^2 + m_2 y_{12}^2 + m_3 y_{13}^2} \quad (5.12)$$

Подставляя, как и раньше, получаем:

$$q_1 = 12,4400 \frac{EJ}{m l^3}$$

Второе приближение получим из (1.08) принимая $n=2$

$$y_{2s} = m_1 \delta_{s1} y_{11} + m_2 \delta_{s2} y_{12} + m_3 \delta_{s3} y_{13};$$

при $s=1,2,3$ имеем соответственно:

$$y_{21} = 1118 \text{ } m^2 g \alpha^2; \quad y_{22} = 1258 \text{ } m^2 g \alpha^2; \quad y_{23} = -2148 \text{ } m^2 g \alpha^2.$$

Подставляя эти значения в (1.06) имеем:

$$q_2 = \frac{m_1 y_{11} y_{21} + m_2 y_{12} y_{22} + m_3 y_{13} y_{23}}{m_1 y_{21}^2 + m_2 y_{22}^2 + m_3 y_{23}^2} = 12,2867 \frac{EJ}{m l^3}$$

Для определения верхнего предела основной частоты методом П. Ф. Папковича используем (2.04) и (2.05) подставляя туда значения чисел B_1, B_2 и B_4 . Для определения того же предела методом С. А. Бернштейна используем правую часть неравенства (4.01) принимая последовательно $n=1, 2$.

Полученные результаты приведены в таблице 2.

5. 3. СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ВЫЧИСЛЕНИЙ.

Результаты предыдущих вычислений приведены в двух таблицах.

Таблица 1.

Нижний предел квадрата основной частоты $\left(\omega \frac{EJ}{m l^3}\right)$

Метод	Приближение n	Первый пример	Второй пример
Ван ден Дунгена, П. Ф. Папковича и С. А. Бернштейна	1 (Донкерли)	13,4069	10,1250
	2	13,8507	12,0748
	3	13,8565	12,2561
	4	13,8566	12,2780
Е. М. Майзеля	1	13,5854	11,3825
	2	13,8528	12,2129

Таблица 2.

Верхний предел квадрата основной частоты $\left(\omega \frac{EJ}{m l^3}\right)$

№№ n/n	Метод	Первый пример		Второй пример	
		Первое приближение	Второе приближение	Первое приближение	Второе приближение
1	Ван ден Дунген [формулы (1.06) и (1.07)]	13,9355 13,8570	13,8566	13,1351 12,4400	12,2867
2	П. Ф. Папкович	14,3094	13,8624	14,4000	12,4845
3	Е. М. Майзель	17,4985	15,6126	21,4313 14,0070	13,1904
4	С. А. Бернштейн	13,8586	13,8566	12,3673	12,2815

§ 6. Выводы

1) Нижние пределы основной частоты колебаний по методам ван ден Дунгена, П. Ф. Папковича и С. А. Бернштейна полностью совпадают. Соответствующая формула является обобщением известной формулы Донкерли. Метод Е. М. Майзеля для данной ступени приближения дает лучшую нижнюю оценку основной частоты.

2) Верхний предел основной частоты получается более точным при вычислении методом ван ден Дунгена и С. А. Бернштейна (при той же затрате времени) по сравнению с методами П. Ф. Папковича и Е. М. Майзеля.

3) Формулы С. А. Бернштейна и Е. М. Майзеля для определения верхнего предела могут быть получены совпадающими по форме [ср. (4.01) и (3.04)].

Однако в то время как С. А. Бернштейн свои коэффициенты B_n вычисляет с учетом полного числа степеней свободы (беря их как след полной матрицы), Е. М. Майзель числа A вычисляет, как след квадратной матрицы, полученной путем вычеркивания $k-2$ строк и $k-2$ столбцов, т. е. по сути дела заменяет систему с k степенями свободы на систему с двумя степенями свободы. Ясно, что верхний предел получаемый по формулам С. А. Бернштейна значительно лучше того же предела, полученного по формулам Е. М. Майзеля.

4) Числа B_n входящие в формулы при больших значениях целесообразнее вычислять методом умножения матриц, беря соответствующие следы, чем непосредственно по формулам ван ден Дунгена и С. А. Бернштейна.

5) Каждым из упомянутых четырех методов можно получить любую точность значения частоты. Однако для практики достаточно ограничиться первым или вторым приближением.

6) Методы П. Ф. Папковича, Е. М. Майзеля и С. А. Бернштейна обладают, каждый в отдельности, определенной внутренней замкнутостью в том смысле, что для определения как верхней, так и нижней оценки, использована единая система рассуждений и выкладок, а вычисления этих оценок основаны на одних и тех же коэффициентах B_n или A_n .

Этой замкнутостью не обладает метод ван ден Дунгена, содержащий, по существу, два несвязанных между собой способа для определения верхней и нижней оценки.

ЛИТЕРАТУРА.

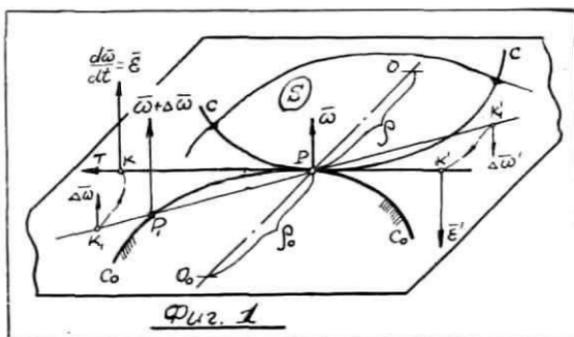
1. С. А. Бернштейн. Новый метод определения частот колебаний упругих систем, изд. ВИА РККА имени В. В. Куйбышева, 1939.
2. F. H. van den Dungen. Über die Biegungsschwingungen einer Welle. ZAMM, Bd 8, Heft 3, 1928
3. Gräffe, Die Auflösung der höheren numerischen Gleichungen, Zürich, 1837
4. К. Б. Бицено и Р. Граммель. Техническая динамика, том II. Гостехиздат, 1952.
5. П. Ф. Папкович. Об одном методе разыскания корней характеристического определителя. Прикладная математика и механика, т. I, вып. 2, 1933.
6. Е. М. Майзель. Уточнение формулы Дайкерлея и приближенное определение низшей частоты колебаний. Прикладная математика и механика, т. III, № 1, 1939.
7. С. Д. Пономарев, В. Л. Бидерман, К. К. Лихарев, В. М. Макушин, Н. Н. Малинин, В. И. Феодосьев. Основы современных методов расчета на прочность в машиностроении. Машгиз, 1952.
8. R. Grammel. Neuere Untersuchungen über kritische Zustände, rasch umlaufender Wellen. Erg. d. exakt. Naturwiss. Bd. I, s. 99, Berlin 1922.
9. G. Kull. Neue Beiträge zum Kapitel: Kritische Drehzahlen schnell-umlaufender Wellen. Z. d. VDI Bd. 62, 1918.

И. И. КАТАЕВ, кандидат технических наук

О ПОНЯТИИ «ТОЧКА ПРИЛОЖЕНИЯ ВЕКТОРНОЙ ПРОИЗВОДНОЙ» И ПРИМЕНЕНИИ ЕГО В КИНЕМАТИКЕ ПЛОСКОГО ДВИЖЕНИЯ

§ 1. Рассматривается непрерывно изменяющаяся со временем векторная функция $\bar{\omega}(t)$ постоянного направления. Точка приложения P этой функции перемещается в пространстве по непрерывной кривой C_0C_0 (фиг. 1). Требуется найти точку приложения K векторной производной $\frac{d\bar{\omega}}{dt} = \bar{\varepsilon}$ (если по физическому смыслу рассматриваемой задачи не обязательно, чтобы векторная производная имела ту же точку приложения, что и сама векторная функция).

Пусть (фиг. 1):



Фиг. 1

$\bar{\omega}$ — значение $\bar{\omega}(t)$ в момент времени t ,

$\bar{\omega} + \Delta\bar{\omega}$ — значение $\bar{\omega}(t)$ в момент времени $t + \Delta t$,

$\Delta\bar{\omega}$ — приращение $\bar{\omega}(t)$ за время Δt ,

P, P_1, K_1 — точки приложения векторов $\bar{\omega}, \bar{\omega} + \Delta\bar{\omega}$ и $\Delta\bar{\omega}$, соответственно.

В виду параллельности рассматриваемых векторов, получим:

$$PK_1 = PP_1 \left(1 + \frac{\omega}{\Delta \alpha} \right) = \frac{PP_1}{\Delta t} \left(\Delta t + \frac{\omega}{\Delta \omega} \right) \quad (1)$$

После предельного перехода (при $\Delta t \rightarrow 0$) будем иметь:

$$PK = V_p \frac{\omega}{\varepsilon} \quad (2)$$

где: V_p — скорость перемещения точки P в пространстве,

$\varepsilon = \frac{d\omega}{dt}$ — алгебраическое значение векторной производной $\frac{d\omega}{dt}$,

K (или K') — точка приложения векторной производной $\frac{d\omega}{dt}$.

В итоге, при оговоренном поведении заданной векторной функции $\omega(t)$, может быть сформулирована следующая теорема:

Точка приложения (K или K') векторной производной лежит на касательной к траектории движения точки приложения P самой функции на расстоянии от точки P , определяемом (2), «вперед» по движению (точка K), если векторная функция и ее производная в данный момент одного направления (одного знака) и «позади» (точка K') — в противном случае.

§ 2. Применим сформулированную теорему к кинематике плоско-параллельного движения плоской фигуры S .

Для этого случая можно принять (фиг. 1):

$\bar{\omega}$ — вектор мгновенной угловой скорости фигуры S ,

$\frac{d\bar{\omega}}{dt} = \bar{\varepsilon}$ — вектор мгновенного углового ускорения фигуры,

P — мгновенный центр скоростей фигуры,

C_0C_0 — неподвижная центроида (ее радиус кривизны в точке P равен ρ_0).

CC — подвижная центроида (ее радиус кривизны в точке P равен ρ).

K (или K') — мгновенный центр углового ускорения фигуры (точка, отличная от мгновенного центра ускорений фигуры).

При этом вектора $\bar{\omega}$ и $\bar{\varepsilon}$ перпендикулярны к плоскости, в которой лежат центроиды.

Из кинематики известно [1], что скорость перемещения мгновенного центра скоростей по неподвижной центроиде может быть определена по выражению

$$V_p = \frac{\omega}{\left| \frac{1}{\rho_0} \pm \frac{1}{\rho} \right|} \quad (3)$$

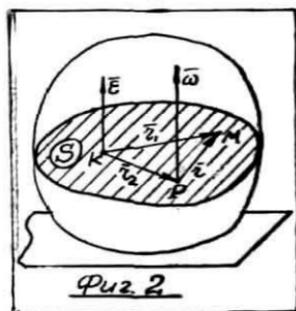
Тогда, из (2) получим:

$$PK = \frac{\omega^2}{\varepsilon} \cdot \frac{1}{\left| \frac{1}{\rho_0} \pm \frac{1}{\rho} \right|} \quad (4)$$

В соответствии с сформулированной теоремой, точка K на общей касательной к центроидам будет «впереди» точки P , при ускоренном качении фигуры S и «позади» — в обратном случае.

Используя понятие мгновенного центра углового ускорения фигуры S (или понятие мгновенной оси углового ускорения для твердого тела), покажем, что при любом непоступательном плоском движении фигуры (и тела), вектор ускорения любой точки фигуры может быть найден как геометрическая сумма двух векторов.

Рассматривая движение фигуры S как переносное, вместе с полюсом P и относительное, вокруг P , [1], для вектора ускорения произвольной точки M получим (фиг. 2):



$$\bar{a}_m = \bar{a}_p + \bar{\omega} \times \bar{v}_m + \bar{\varepsilon} \times \bar{r} = \bar{a}_p - \bar{\varepsilon} \times \bar{r}_2 + \bar{\omega} \times \bar{v}_m + \bar{\varepsilon} \times \bar{r}_1 \quad (5)$$

где:

\bar{a}_p — вектор ускорения точки P ,

\bar{v}_m — вектор скорости точки M ,

P — мгновенный центр скоростей фигуры S ,

K — мгновенный центр углового ускорения фигуры S ,

\bar{r} , \bar{r}_1 , \bar{r}_2 — радиусы — векторы точек, направленные как показано.

Имеет место равенство (6):

$$\bar{a}_p = \bar{\varepsilon} \times \bar{r}_2 \quad (6)$$

Справедливость (6) вытекает из сопоставления правил определения величины и направления вектора a_p , известных из кинематики [1], и правил определения векторного произведения, с учетом особенностей данной задачи (т. е. с учетом изложенных правил нахождения вектора $\bar{r}_2 = -\overline{PK}$).

Имея в виду (6) из (5) получим:

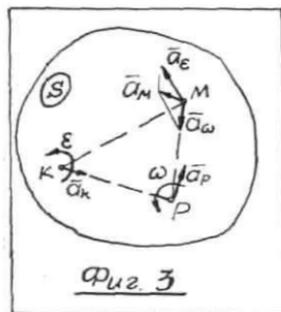
$$\bar{a}_m = \bar{\omega} \times \bar{v}_m + \bar{\varepsilon} \times \bar{r}_1 = \bar{a}_\omega + \bar{a}_\varepsilon \quad (7)$$

где:

$$\left. \begin{aligned} \bar{a}_\omega &= \bar{\omega} \times \bar{v}_m \\ \bar{a}_\varepsilon &= \bar{\varepsilon} \times \bar{r}_1 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$$\left. \begin{aligned} |\bar{a}_\omega| &= \omega^2 r \\ |\bar{a}_\varepsilon| &= \varepsilon \cdot r_1 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Направления составляющих вектора ускорения точки M , а также ускорения точек P и K показаны на фиг. 3.



Для частного случая равномерного качения фигуры S ($\varepsilon = 0$) имеем.

$$|PK| = |r_2| = \infty,$$

и второе слагаемое (7) в итоге приводится к виду:

$$|\bar{a}_\varepsilon| = 0 \cdot \infty.$$

Однако, в соответствии с (6):

$$\bar{a}_\varepsilon = \bar{\varepsilon} \times \bar{r}_1 = \bar{\varepsilon} \times (\bar{r}_2 + \bar{r}) = \bar{\varepsilon} \times \bar{r}_2 = \bar{a}_p.$$

Таким образом, в данном случае (при $\varepsilon = 0$):

$$\bar{a}_m = \bar{a}_p + \bar{a}_o, \quad (10),$$

причем \bar{a}_p определяется по известным правилам кинематики.

Выражение (7) позволяет распространить на общий случай плоско-параллельного движения твердого тела идею Н. Е. Жуковского, сформулированную им для случая вращения твердого тела вокруг неподвижной оси [2].

А именно: любое неступательное плоско-параллельное движение твердого тела можно рассматривать как сочетание двух вращений: перманентного — вращения вокруг оси мгновенной угловой скорости (вокруг мгновенного центра скоростей — для фигуры S) с постоянной угловой скоростью, равной мгновенной угловой скорости тела в данном положении, и начального — вращения вокруг мгновенной оси углового ускорения (вокруг мгновенного центра углового ускорения — для фигуры S), происходящего только с угловым ускорением, равным мгновенному угловому ускорению тела в данном положении.

Исходя из такого представления о движении тела, ускорение любой точки тела может быть определено, как геометрическая сумма двух ускорений: осестремительного (центростремительного) — ускорения в перманентном движении и вращательного (касательного) — ускорения в начальном движении.

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. Г. Лойцянский и А. И. Лурье. Курс теоретической механики, т. I, ГИТТЛ, 1954 г.
2. Н. Е. Жуковский. Сведение динамической задачи о кинематической цепи к задаче о рычаге, собрание сочинений, т. III, ГИТТЛ, 1949 г.

P. BĒRZKALNS, Doc. arch. kand.

LATVIJAS MAZĀS DZĪVOJAMĀS ĒKAS XVII GADSIMTĀ¹

Senākais vēstures posms, no kura par Latvijas lauku un pilsētu apbūvi saglabājušies uzskatāmi literatūras un arhīvu materiāli, ir 17. gadsimts.

Latvijas teritorija šai laikmetā ir sadalīta starp 3 valstīm: Kurzeme un Zemgale ietilpst Kurzemes hercogistē, Rīga un Vidzeme pakļautas Zviedrijai, bet Latgalē valda Lietuva un Polija. Politiskā stabilizācija Baltijas jūras piekrastē iesākas tikai ar 18. gadsimtu. 17. gadsimts vēl ir pilns kara gājienu un ar tiem savienotiem lauku un pilsētu postījumiem.

Visos trijos Latvijas apgabalos šai laikā laukos valda dzimniecība ar dažām sīkām atšķirībām katrā apgabalā. Pēc vēstures ziņām zemnieku dzīves apstākļi mazliet labāki ir Kurzemes hercoga muižās, turpretim ļoti smagi tie ir privātajās muižās. Zemnieku šķira arī dzimniecības laikos nav viengabalīga. Tur ir saimnieku kārtā ar dažāda lieluma saimniecībām, tur ir arī bezzemnieki — kalpi, iebūvieši un lauku amatnieki. Pēdējie pārtiek pa daļai no sava amata, pa daļai no lauksaimniecības.

Starp Latvijas pilsētām izcils stāvoklis kā arvien ir Rīgai. Kurzemes hercogistē uzplaukst Jelgava un Kuldīga. Blakus tām XVII gadsimtā tur vispār rodas samērā izkopts nelielu pilsētu un ciemu tīkls. Arī hercoga muižās ar manufaktūras uzņēmumiem izveidojas par lielākām lauku apdzīvotām vietām. Vidzemes mazākās pilsētas — Cēsis un Valmiera šai laikmetā nīkulo. Latgalē pārējo apdzīvoto vietu starpā kā pilsēta izceļas vienīgi Daugavpils.

Pilsētu iedzīvotāji sadalās divos galvenajos sabiedrības slāņos — tirgotājos un amatniekos. Lielākajās pilsētās šīs abas grupas nav viengabalīgas. Amatnieku apakšējām slāņim pievienojas jau neliels strādnieku skaits. Muižnieku šķira un pilsētu tirgotāji ir cittautieši, vairumā vācieši, Latgalē — poļi. Tāpat arī pilsētu

amatnieki lielāko tiesu ir vācieši. Kurzemes pilsētās ap 17. gadsimta beigām dzīvo daudz ebreju. Pilsētu mazturīgākās aprindas visvairāk veidojas no ienācējiem zemniekiem. Lauku rajonos zemnieki ir dažādu tautību, tomēr pārsvarā te ir latvieši.

Ziņu par mazākām 17. gadsimtā saglabājies ļoti maz. It sevišķi trūcīgas tās par Latgali. Salīdzinot ar vēlākajiem laikmetiem, 17. gadsimta ēkas ir mazas. Tikai agrākās apcietinātās pils, kā arī valdnieku un lielāko muižnieku un pilsētu bagātāko tinguņu dzīvojamās ēkas šai laikmetā atšķiras no mazēku kategorijas. Mazākās muižās pat muižnieku dzīvojamās ēkas 17. gadsimtā nav bijušas daudz lielākas par Kurzemes un Zemgales saimnieku ēkām 19. gadsimta otrā pusē.

No šā laikmeta pilsētām visvairāk ziņu ir par Rīgu un tās apbūvi. Bet Rīgas kā cietokšņa pilsētas ēkas savā plānojumā un uzbūvē ir īpatnējākas. Tās stipri atšķiras no ēkām citās pilsētās un ciemos. Laikmetam raksturīgās mazēkas ir celtas tikai Rīgas nomalēs, ārpus pilsētas apcietinājumiem. Šā laikmeta tipiskās mazēkas meklējamas Latvijas mazākajās pilsētās un ciemos. Ziņas par šādām ēkām tomēr ir tik trūcīgas, ka nākas vākt kopā visus materialus, kas tieši vai netieši var noderēt mazēku pētišanai.

Vecākais grafiskais materials, kas saglabājies par Latvijas pilsētu apbūvi, ir 16. gadsimta Rīgas skats Minsterā Kosmografiijā.² Šis attēls ar baznīcu torņiem un pili jau rāda raksturīgo Rīgas siluetu. Tomēr datu dzīvojamo ēku pētišanai tas dod ļoti maz. Pirmais Rīgas attēls, kas viscaur rāda labu Rīgas apbūves pazīšanu, ir N. Mollīna 1612. gada vara grebums, no kura 3 lapa glabājas Rīgas pilsētas vēstures (Doma) muzejā. Blakus Mollīna Rīgas attēlam var vēl minēt mērnieka T. Krauzes 1652. gada Jelgavas plānu ar aksonometriskiem apbūves attēliem. No 17. gadsimta ir saglabājušies arī daži citi attēli, taču pilsētu nomaļu ēku pētišanai tie mazāk noderīgi. Daži interesanti dati par Rīgas nomaļu apbūvi atrodami Rīgas nomaļu zemes gabalu uzņēmījumos, kas izdarīti 17. gadsimta beigās. Šai laikā mērnieku pilsētas centram tuvākajām daļām mēdza izgatavot kārtīgus mērniecības plānus ar zemes gabalu robežām, ar datiem par zemes gabalu izlietošanu — dārzam, pagalmam un apbūvei, bet nomalēs tie aprobežojās ar zemes gabalu robežām un aksonometriskām ēku skicēm. Šīs skices ir schematiskas, bet tās rāda toreiz parastākos apbūves tipus.

No 17. gadsimta ir saglabājušies attēli par Meijerberga ceļojumu 1661. gadā cauri Kurzemei, Zemgalei un Vidzemes austrumu daļai. Šie gleznieciskā uztverē izstrādātie kolorētie zīmējumi dod vispārīgu jēdzienu par lauku apdzīvoto vietu kopskatiem 17. gadsimta vidū.

18. gadsimta pirmajiem gadiem pieder tā dēvētā grafa Horna vara grebumu kolekcija, kurā ir arī daži Latvijas pilsētu skati.³

Tie ir galvenie uzskatāmie materiāli, ko arhitekts pagaidām mazēku pētišanai var izlietot. Vairāki gadījuma rakstura attēli no 17. gadsimta pilsētu nomaļu apbūves atrodami vēl dažās citās gravīrās, bet to izlietošanai nepieciešama šādu dokumentu sīka vēsturiska pārbaude un kritika.

Tikpat trūcīgas ir ziņas, kas atrodamas tā laika pilsētu un apdzīvoto vietu apbūves aprakstos. Šādi vēstures avoti par 17. gadsimtu nav vēl pilnīgi sistematizēti, un daži no tiem Latvijas PSR bibliotekās nav nemaz atrodami. Pazīstamākie apraksti pieder ceļotājiem, kas savas atmiņas par redzēto sakopojusi pēc atgriešanās dzimtenē. Šādos aprakstos tādēļ ir daudz trūkumu un izdomājumu. Vēsturniekiem tie iepriekš sīki jāapstrādā un jānovērtē. Šo aprakstu kritisks novērtējums no vēsturnieku puses pagaidām dots tikai vispārīgā veidā.⁴

Agrākajos gados par muižu apbūvi Latvijas valsts arhīvā ir saglabājušies vērtīgi dokumenti: Vidzemei no 1626., Kurzemei no 1630. gada. Lielā Tēvijas kara laikā šie dokumenti ir gājuši zudumā, un patlaban pieejami vairs tikai publicētie materiāli.

17. gadsimtā Latvijas pilsētu un lauku ēkas savos izmēros vispār ir bijušas mazākas, un tām ir bijis vienkāršāks plānojums un konstruktīvais izveidojums nekā 18. gadsimta beigu vai 19. gadsimta sākuma ēkām. Arī muižnieku lauku mājām šai laikā bijusi ļoti vienkārša būvprogramma. Ļaudonas muižas aprakstā, kas saglabājies no 16. gadsimta beigām (1590. g.), muižas dzīvojamā ēka minēta kā divstāvu koka ēka ar dēļu segumu. Apakšstāvā ēkas vidū tai bijis priekšnams ar kāpnēm uz augšstāvu. Priekšnama vienā pusē bijusi istaba ar 4 logiem un vienkāršu podiņu krāsnī, aiz istabas kambaris; no istabas bijusi eja un kāpnes uz pagrabu. Otrā pusē priekšnamam arī bijusi istaba, bet ar vienkāršāku podiņu krāsnī un logu bez stikla rūtīm. Divas līdzīgas istabas ar kambari, bet bez krāsnīm bijušas arī augšstāvā. Aprakstā nav sīkāku datu par dzīvojamās ēkas apkures ietaisēm un dūmu izvadīšanu. Ļaudonas muižas sētsvidū atrodas virtuve bez dūmeņa, ar dēļu segumu, aiz tās istaba bez stikla logiem. Muižas apbūvē vēl minēts stallis, pie kura piebūvēta istaba ar krāsnī un stikla logu, tālāk — lopu kūtis, klēts un divas rijas ar kopēju piedarbu. Virs klēts uzcelts otrs stāvs, kur ietaisīts dzīvoklis ar priekšnamu un istabu ar 3 stikla logiem un krāsnī. Apkārt šim dzīvoklim aptaisīts vaļējs lievenis.⁵

Daudzās muižās dzīvojamām ēkām bijis tikpat vienkāršs plānojums arī vēlākajā laikā, kas redzams no Slampes muižas apraksta 19. gadsimtā:

«Mūsu nams bija celts tāpat kā visi toreizējie kungu nami.

Katram namam vispirms bija ārkārtīgi liels priekšnams. Slampē tas bija kādas 4 asis garš un divarpus asis plats. Priekšējā pusē tam atradās ieejas durvis un katrā pusē tām liels logs. . . . Otra garā siena bija viena no četrām mantļa skursteņa sienām. Tas bija 4 asis garš un 3 asis plats . . . Sai lielajā telpā bija ķēķis. Tā vidū atradās ķieģeļu pavards, virs tā visā garumā bija divas, astoņas vai vairāk pēdas garas dzelzs kārtis, uz kurām novietoja vārāmos traukus. Tiem apakšā kūra uguni . . . Toreiz visas krāsnis kurināja no ķēķa vai no speciāli izbūvētas telpas. Septiņas un vairāk pēdas gara krāsns sastāvēja no tukšas telpas, ko papildīja un kurināja ar asi garu malku . . . Graudzes vecā kungu mājai bija divi stāvi, apakšējais no laukakmeņiem, augšējais — koka. Apakšstāvā katrā galā bija tikai viena dzīvojamā istaba. Citu aizņēma ķēķis, priekšējais un pakalējais priekšnams, pāris pieliekamo telpu un akmens trepes, kas veda augšas velvētā telpā. Šī telpa aizņēma ceturto daļu no augšstāva un no tās kurināja 3 krāsnis trīs blakus novietotās istabās . . . Ieeja pagrabā visās muižās, ko esmu redzējis, bija no zāles.»⁶

Arī šinī aprakstā minētās dzīvojamās ēkas ir simetriskas celtnes ar priekšnamu vidū un vienu dzīvojamo telpu katrā galā. Jauns elements šais ēkās ir centralā virtuve ar apvalkdūmeni.

Ja arī dažās lielās muižās dzīvojamās ēkas ir mūra celtnes, tad Kurzemes un Zemgales kroņa muižās (Amtshof) pārvaldnieku dzīvojamās ēkas 17. gadsimtā parasti ir vienstāva koka gulbūves ar salmu jumtiem. Pēc aprakstiem tādas celtnes svarīgākās sastāvdaļas ir priekšnams ar virtuvi, kurā ietaisīts apvalkdūmenis, un no virtuves apkurināmā istaba. Apkārt istabai iekārtoti neapkurināmie kambari. 18. gadsimta sākumā tādu kambaru skaits ir pieaudzis līdz četriem. Tur ir divi tā dēvētie sānu kambari un divi gala kambari, no kuriem vienu sauc arī par stūra kambari. Sānu kambari, kas atrodas blakus virtuvei, dažviet iemūrēta īpaša krāsns.⁷ Plašākās ēkās priekšnama otrā pusē ir otra istaba ar līdzīgu vai mazāku kambaru skaitu.⁸ Zem ēkām ir pagrabi, kuros var ieiet no gala vai stūra kambara. Tādiem pagrabiem ir arī otra ieeja no āra.⁹ Muižu dzīvojamām ēkām ir dēļu grīdas, dēļu griesti un īpašās pagalma piebūvēs atejas. Muižu aprakstos blakus krāsnīm dažkārt minēti vēl kamini, kas ietaisīti tieši istabās.¹⁰ Šie dati par Kurzemes un Zemgales muižām ir gan no 18. gadsimta, bet tie raksturo celtniecības tradīcijas, kas bijušas izkoptas jau agrākos laikos.

Vidzemē — Ates muižā (Ottenhof) koka dzīvojamā ēka 1688. gadā ir 12×6 asis liela.¹¹ Tās vidū ir priekšnams, aiz tā virtuve ar dūmeni. Virtuvē ir 2 pēdas augsts no laukakmeņiem mūrēts pavards. Tālāk otrs priekšnams ar otru izeju. Pa labi no priekšnama atrodas kungu istaba (Herrenstube) ar sānu kambari un

diviem gala kambariem. Istabā ir zaļa podiņu krāsns, 3 logi ar 6 vērtņēm; katrā no tām 20 rūtis. Istabā ietaisīta arī lūka uz pagrabu, kas atrodas zem gala kambariem. Gala kambarim ir 3 logi ar 4 vērtņēm, pa 25 rūtīm katrā. Ekai ir vēl īpašs virtuves kambaris (Küchenkammer). Lai no virtuves būtu ērtāk pasniegt ēdienu, istabas sienā ietaisīta aila, kas parasti noslēgta ar koka durtiņām. No priekšnama pa kreisi ir ļaužu istaba (Gesindestube) ar mazvērtīgiem logiem, kam daudzas rūtis izsistas. Aiz tās — dibenskambaris (Hinterkammer) ar maziem logiem; blakus istabai sānu kambaris (Seitenkammer), kam viens logs ar 3 vērtņēm, pa 30 rūtīm katrā, un, beidzot, šīnī pusē ir vēl īpašs gala kambaris (Endenkammer) ar vienu 4 vērtņu logu, pa 16 rūtīm katrā vērtņē. Visām telpām ir dēļu griesti un dēļu grīdas. Raksturīgi dažādie logu lielumi katrā telpā. Ēku cēlējam maz rūpējies logu ailu sakārtojums ārsienās, viņu vairāk interesējis tikai atsevišķo telpu iekšējais izveidojums. Ates muižas aprakstā ievēribu pelna arī norādījumus par telpu lietošanu. Simetriski izplānotā būvķermeņa vienu galu apdzīvo muižnieka ģimene, otru muižas kalpotāji. Muižnieka mājoklis tādēļ ir tikai viena istaba ar kambariem,

No šiem aprakstiem redzams, ka muižnieku dzīvojamās ēkas plānojumā 17. gadsimtā vērojama tā pati attīstības gaita, kas raksturīga 19. gadsimta saimnieku dzīvojamās ēkās. Mājokļa programma muižās ir tikai mazliet sarežģītāka, ar lielāku telpu skaitu.

Pāreju no muižnieku dzīvojamām ēkām uz mazekām rāda «ērbeģis», kur dzīvo muižas kalpotāji. Šīs ēkas plānojums mazēku attīstībai ir ļoti svarīgs, tādēļ pie tā aprakstiem jāuzkavējas sīkāk.

Dzūkstes mācītāja muižā 1683. gadā ir divi ērbeģi, no kuriem jaunais vēl nav pabeigts. Vecais ērbeģis — koka ēka ar salmu jumtu — uzcelta zem viena jumta ar klēti. Ēkas vidū ir priekšnams, tam blakus istaba ar gala kambari, pie tā ateja. Istabā ir krāsns un stikla logi, bet aprakstā nekas nav minēts par dūmeni. Kambarim ir tikai mazs lodziņš. Otram — jaunajam ērbeģim ir apmēram tāds pats plānojums, vienīgi priekšnama otrā pusē tam ir pirts.¹²

Arī Pienavas muižā 1716. gadā ir divi ērbeģi. Viens no tiem ir mūra ar salmu jumtu. Tā vidū atrodas priekšnams ar virtuvi un dūmeni. No priekšnama pa labi — istaba un sānu kambaris ar stikla logiem. Tiklab istabā, kā kambarī dēļu grīdas un zaļas vāpētu podiņu krāsns. Priekšnamam otrā pusē ir lielāka istaba ar klonu, bez stikla logiem. Pienavas muižas otrs ērbeģis ir veca koka ēka ar salmu jumtu. Ēkas vidū priekšnams, tā vienā pusē istaba ar sānu kambari, gala kambari, vienu mazu kambarīti un ateju. Otrā pusē — istaba ar gala kambari. Ekai 5 logi, podiņu krāsns, istabām un kambariem dēļu grīdas.¹³

Bērzmuižā 1728. gadā ir tikai viens ērbeģis, labā stāvoklī. Tas ir koka, ar salmu jumtu un vienu dūmeni. Vidū priekšnams, aiz tā mūra virtuve (ar apvalkdūmeni?), mazs kambarītis un ateja. Priekšnama vienā pusē ir istaba ar diviem sānu kambariem, otrā pusē istaba ar diviem kambariem. Ekai ir desmit durvis ar dzelzs virām, viena vāpēto un divas parasto podiņu krāsnis un stikla logi.¹⁴

Sipeles muižas 1720. gada aprakstā minēti divi ērbeģi ar salmu jumtiem. Vienam vidū ir priekšnams un virtuve ar dūmeni (apvalkdūmeni?). Katrā pusē tam pa istabai ar kambari. Telpām māla kloni un deģu griesti. Ekā divas krāsnis, īpaša maizes krāsns, 8 durvis un 8 stikla logi. Otrs ērbeģis uzcelts zem viena jumta ar pirti; tam ir priekšnams, istaba un kambaris. Šis ērbeģis atrodas tālāk no pārējām muižas ēkām, un nekas nav minēts par dūmeni.¹⁵

Zemgales muižu ērbeģi plānojuma ziņā ir ļoti līdzīgi vēlākā laika zemnieku un arī pilsētu vidusšķiras dzīvojamām ēkām. Raksturīgi šais ērbeģos ir gala kambari, pie kuriem dažkārt (Džūkste, 1863. g., Pienava, 1716. g.) piebūvēta ateja. Domājams, ka šie kambari lietoti par guļamtelpām. Arī kroņa muižu pārvaldnieku ēkās, kā rāda apraksti, atējas bijušas pie kambariem.

Meijerberga Zemgales attēlos redzamas kroņa muižas ar visām ēkām. Lai šos attēlus varētu labāk izprast, apskatīsim Pienavas muižas (Amtshof) 1716. gada ēkas. Bez dzīvojamām ēkām tur vēl ir šādas ēkas: divi zirgu stalli ar šķūņiem, trīs klētis (no tām viena divstāvu), plaša lopu kūts, putnu kūts, pirts ar maizes ceptuvi un lopu kaujamo telpu, kalve, siena šķūnis, divas rijas ar kopēju piederību un iesala rija.¹⁶ Muižas ēku komplekss iežogots ar sētu. Dažās muižās (Sipele, 1720. g.) tam apkārt aptaisīts mūrīšs. Ārpus iežogojuma atrodas vienīgi rijas.

No 17. gadsimta saglabājušies daži dati par Vidzemes kroņa pusmuižām (Hoflage).¹⁷ Seķu pusmuižas (Sackenhoffs Hoflage) ērbeģis 1688. gadā ir 12×4½ asis liela apaļkoku gulbūve ar salmu jumtu. Tai ir šādas telpas: priekšnams, istaba (welche aber nur der Baur Ahrt nach alss eine Riehe formiert) un kambaris. (Citi tā laika muižu ēku apraksti rāda, ka rijas veida istaba ir istaba bez dūmeņa, ar krāsmuļi apkurināmajā telpā.) Istabā nav stikla logu; to vietā izcirstas divas logu aillas, kuras aiztaisa ar mazām durtiņām (Klaphüren). No kambara īpaša āra izeja, zem kambara pagrabs. Krāsns mūrēta no laukakmeņiem un māliem.

Rencēnu muižai šai laikā ir divas pusmuižas — «Creijan» un «Schwenne Moise», kas ierikotas agrākajās zemnieku mājās. So pusmuižu dzīvojamām ēkām ir priekšnams, istaba un divi kambari, kas atrodas zem viena jumta ar saimniecības telpām —

vienā muižā ar stalli, otrā — ar rātnīcu. Tās pašas muižas Luttera (Lutterhoff) pusmuižas jaunceltajā koka dzīvojamā ēkā, kuras ārējie izmēri ir 8×9 asis, ir priekšnams, divas istabas un trīs kambari. Priekšnamā virs pavarda uzcelts dūmenis Vilzēnu muižas dzīvojamās ēkas aprakstā šāds dūmenis ir tuvāk aprakstīts: tas uzcelts no māliem un no koka.¹⁸ Visai bieži priekšstelpā tāda apvalkdūmeņa nav, ir tikai no māliem un koka uztaisīts dzirksteli uztvērējs jeb rovis.¹⁹ Muižu ēkās istabām parasti ir podiņu krāsnis (Pottkachelichter Ofen) un stikla logi ar sīkām, svinā iestrādātām rūtīm.

Starp vienkāršajām muižu ēkām minams arī krogs.²⁰ Krodzinieks 17. gadsimtā ir amatnieks, dažviet arī muižas dzimteilvēks, ar nelielu saimniecību. Atkarībā no kroga atrašanās vietas, tanī jāsagādā piemērotas telpas ne tikai ceļavīriem zemniekiem, bet arī valsts ierēdņiem un muižniekiem. Vidzemē (1688. gada aprakstos) kroga ēka parasti ir koka guļbūve ar pakšiem. Tai ir salmu vai lubu jumts. Kroga ēkai visbiežāk ir trīs telpas, kas atrodas cita citai blakus: stadula, istaba un kambaris. Dažos krogos kambaru ir vairāk, un mazākais stūra kambaris tiek lietots par pieliekamo telpu. Kroga istabai ir dēļu griesti un māla klons; pie sienas gar stadulu atrodas podiņu krāsns (Pottkachelichter Ofen auf ein gemauertes Fuss), ko apkurina no stadulas. Stadulā virs krāsns kurtuves un pavarda ietaisīts rovis («Über den Ofenloch zu der Stuben ist ein Roff von Lehm und Holzwerk verfertigt»). Kroga istabai parasti ir stikla logi no mazām stikla rutiņām, visbiežāk pa 15, 20, 25 vai 30 rutiņām katrā vērtņē. Krogos, kas atrodas pie mazsvarīgiem ceļiem, istabās krāsnis mūrētas no laukakmeņiem; tur nav arī stikla logu, un griesti likti no apaļiem kokiem.²¹ Mēdz būt vēl krogi, kas celti līdzīgi rijām.²² To izveidojums nav sīkāk aprakstīts, bet tā kā dažos piemēros tiem stadula nav celta tieši pie kroga ēkas, tad domājams, ka šādi krogi ir ar dūmu istabām. Aprakstos teikts, ka tiem nav stikla logu un durvīm nav dzelzs apkalumu. 1688. gada krogu aprakstos atrodams arī piemērs, kur krodziniekam, kas ir mācīts amatnieks, uzcelta vēl īpaša dzīvojamā ēka. Tā ir koka, ar salmu jumtu, 2²/₃ ass kvadratā, un tanī ir priekšnams un istaba. Istabai ir podiņu krāsns un stikla logs ar nedaudzām mazām rūtīm.²³ Krogu labierīcību līmenis šai laikā nav bijis augsts, jo vēl 1697. gadā valdība izdod sevišķu rīkojumu, ka pie svarīgiem lielceļiem krogos ierīkojamas dažas istabas ar krāsnīm vai kaminiem un dūmeņiem, kur ceļotāji varētu sasildīties.²⁴

Tāpat kā krogs arī dzirnavas ir svarīgs muižu uzņēmums, ko vada melderis, kas ir mācīts amatnieks un kas līdz pat 20. gadsimtam bieži vien mēdz būt vācu tautības. 17. gadsimta beigās labākajās melderu mājās ir priekšstelpa, kurā atrodas pavards ar

rovi un no koka un māliem taisīts dūmenis. Tur blakus virtuvei ir istaba ar podiņu krāsni un viens vai divi kambari.²⁵

Ļoti raksturīgs ir Limbažu muižas melderu dzīvojamās ēkas apraksts, kas uzglabājies no 1688. gada. Tanī teikts, ka melderu māja ir koka guļbūve, 10 asu gara un 3 $\frac{1}{2}$ asis plata, ar lubu jumtu. Virs pavarda (virtuves) tai no māliem un no koka taisīts rovis ar mazu tāda paša materiāla dūmeni. Istabā podiņu krāsns, 2 divveru logi ar 27 četrstūrainām rūtīm katrā vērtņē; istabas galā kambaris ar āra izeju; kambarī viens divveru logs ar 27 četrstūrainām rūtīm.²⁶

Melderu dzīvojamām ēkām tiklab istabās, kā kambaros ir dēļu griesti un māla klons. Tā laika ēku aprakstos liela vērība veltīta durvju apkalumiem kā vērtīgam muižas inventāram. Melderu mājās durvīm parasti ir dzelzs viras un rokturis, bet kambaru durvīm dažviet arī atslēgas. Kaut gan parastajam melderu dzīvoklim bijušas 3—4 telpas, tomēr 1688. gada muižu ēku aprakstos minētas arī daudz vienkāršākas vecas melderu mājas. Piemēram, Raunas muižā, kur jaunas dzirnavas uzceltas tikai 1675. gadā, melderis 1688. gadā vēl dzīvo vecā ēkā, kas atrodas zem viena jumta ar zirgu stalli, piedarbu un riju. Tieši rijas galā piebūvēta istaba ar kambari. Šinī istabā ir podiņu krāsns, ko kurina no istabas, un krāsnspriekšā rovis. Dūmus izlaiž pa durvīm rijas telpā.

Vecās dzirnavās, kam nav lielas nozīmes, melderis dzīvo arī vientelpā — dūmu istabā, piemēram Sērmūkšu muižas dzirnavās.²⁷ Ļaudonā uzcelta jauna dzirnavu ēka, kur melderim ierīkots dzīvoklis ar priekštelpu, istabu un diviem kambariem. Taču arī šo dzirnavu ēku sarakstā atrodama maza celtne, kas apzīmēta par riju, bet kas, tāpat kā Sērmūkšu muižas dzirnavās, varētu būt bijusi arī melderu vecā dzīvojamā ēka.²⁸ Ēku aprakstos nav sīkaku norādījumu par telpu iekārtas priekšmetiem. Vairākās vietās tiklab kroga, kā dzirnavu istabā minēts vienīgi galds, kam pa labi vai pa kreisi atrodas kambaru ieejas durvis.

Šais inventarizācijas dokumentos parādās etnografiskos apcerējumos līdz šim vēl neminēts lauku dzīvojamās ēkas tips — dūmu istaba ar kambari. Šis tips atkārtojas arī kroga ēkās, kas celtas pēc zemnieku parašām. Raksturīgi, ka vienam tādām vecām krogam blakus uzcelta krodzinieka, kas ir mācīts amatnieks, dzīvojamā ēka ar namu un istabu un no nama kurināmu podiņu krāsni.

Vidzemes 1688. gada muižu aprakstos minētas arī muižu amatnieku un piemitņu dzīvojamās mājas.²⁹ Šis muižu amatnieku un piemitņu dzīvojamās ēkas pelna sevišķu ievērību, jo par zemnieku mājām muižu aprakstos ziņu nav, un pēc sava sabiedriskā stāvokļa amatnieki un piemitņi stāv vistuvāk dzimtcilvēku

zemniekam. Aprakstos šādas ēkas sauc par rijām, kaut gan blakus tām ir vēl īpašas rijas ēkas. Dažos aprakstos pat tieši uzsvērts, ka tās izveidojuma ziņā atšķiras no muižnieku dzīvojamām ēkām un rijas nosaukums te nozīmē zemnieku istabu. No atsevišķo ēku aprakstiem redzams, ka šādām ēkām nav stikla logu un durvis ir bez dzelzs apkalumiem. Šādās ēkās visbiežāk ir tikai istaba un aiz tās kambaris. Vienā piemērā gan minēta arī lietošanai noderīga priekštelpa. Pēc šīm pazīmēm var spriest, ka par rijām tādas dzīvojamās ēkas sauktas tādēļ, ka krāsnis tur kurinātas no dzīvojamās telpas, un istabas tur būs bijušas tā dēvētās dūmu istabas.³⁰

Muižu ēku aprakstos trūkst ziņu par Vidzemes saimnieku mājām. Tur ir gan ziņas par pusmuižām, kas ierīkotas agrākajās zemnieku mājās, bet nav nosakāms, vai dzīvojamās ēkas ar priekšnamu, istabu un kambari ir saglabājušās no tām.

Literatūrā nav drošu datu, kas šīs ziņas papildinātu. Šim nolūkam maz noderīgi arī ceļojumu apraksti. Plašākais ceļojuma apraksts, kas līdz šim zemnieku māju raksturošanai izmantots, ir 1702. gadā publicētā I. A. Branda grāmata par ceļojumu 1673. gada rudenī cauri Kurzemei, Zemgalei un Vidzemei uz Pliskavu un tālāk uz Maskavu.³¹ Pats ceļojuma apraksts arhitektūras pētījumam materiālu dod maz, bet tur atrodams īss etnografisks apcerējums par Kurzemi un Vidzemi un tās iedzīvotājiem. Šai apcerējumā, kā redzams no ceļojuma gaitas, autors atstāsta gan savus paša novērojumus, gan arī ziņas, ko viņš savācis no citiem. Apraksts, liekas, uzrakstīts vēlāk — pēc atgriešanās no ceļojuma, un iecerētajiem kopsavilkumiem dažviet ir pietrūcis noteikta faktu materiāla. Tādēļ datu viena daļa ir pareiza, bet otra stipri apšaubāma. Tādas apšaubāmas ziņas pagadās it īpaši viņa etnografiskajos aprakstos.

Uz Branda etnografisko aprakstu trūkumiem aizrāda jau pēc 100 gadiem kāds anonīms autors mazā Jelgavas periodiskā izdevumā.³² Tas izsaka izbrīnu, ka kurzemnieki 17. gadsimtā būtu ēduši daudz gurķu un ka rijās kaltēto labību tie kūlušī nevis ar spriguļiem, bet minuši ar zirgiem. Branda aprakstā minēti pat ne zirgi, bet vērši. Lasot tagad Branda ceļojuma aprakstu, tur var atrast arī citas līdzīgas apšaubāmas ziņas, kas liecina, ka viņa etnografiskajā apcerējumā tiešie novērojumi sajaukušies ar nostāstiem vai izdomu tādā mērā, ka vairs nav iespējams atšķirt, kur beidzas patiesība un kur sākas izdoma.

No Branda Kurzemes un Zemgales zemnieku sētu apraksta var secināt, ka tur bijušas šādas ēkas: dzīvojamā ēka, klēts, kūts, rija un pirts, kaut gan piemētināts, ka labības kaltēšana dažviet notiekot arī dūmu istabās.³³ No teiktā par dzīvojamo ēku izriet, ka tā bijusi koka gultūve bez dūmeņa, ar divām telpām — istabu

un kambari. Baļķi no ārpuses bijuši aptēsti, jumts segts ar salmiem vai lubām.³⁴

Vidzemnieku, spriežot pēc valodas paraugiem, Brands apraksta kā igauņi. Labklājības līmenis Vidzemē esot zemāks nekā Kurzemē. Kurzemē dzīvojamās ēkas celšanai lietoti no ārpuses aptēsti baļķi, Vidzemē tā celta no apaļbaļķiem. Vidzemes dzīvojamā ēka parasti esot vientelpa, tikai dažiem zemniekiem pie istabas bijis uzcelts vēl kambaris. Vidzemē arī istablietas esot trūcīgākas, jo tur neesot redzētas gultas. Pats raksturīgākais par Vidzemes dzīvojamo ēku ir norādījums, ka tā esot tā dēvētā dzīvojamā rija, kurā ne tikai dzīvojot, bet arī žāvējot labību, kaut gan vietumis dažiem zemniekiem šim nolūkam esot vēl īpašas ēkas.³⁵

Nav tomēr skaidrs, vai dzīvojamās ēkas apraksts attiecas uz igauņu apdzīvoto teritoriju, vai uz Vidzemes dienvidu daļu, kas ceļojumā redzēta. Tas, kas teikts par dzīvojamo riju, ir ticams, bet dzīvojamās ēkas apraksts ir izplūdis un maz atšķiras no Kurzemes un no Pliskavas ēku aprakstiem. Brands gan raksta, ka Pliskavā pie dzīvojamās ēkas parasti vēl esot piebūvēta arī kūts.³⁶

Brands saka, ka krievu dūmistabās esot citādas krāsniņi nekā Kurzemē un Vidzemē. Krievijā tās taisot no māla un ar platu virsu, turpretim Kurzemē un Vidzemē krāsniņi mūrējot no lieliem laukakmeņiem, un tās izskatoties kā Vācijas maizes krāsniņi.³⁷ Tomēr arī šis Kurzemes un Vidzemes istabas krāsniņi apraksts rada šaubas, jo līdzīga krāsniņi minēta arī Kurzemes pirtīs.³⁸ No apraksta galu galā nav noteicams, vai tāda krāsniņi redzēta Vidzemē vai Kurzemē, dūmistabā vai pirtī. Vispār Branda Latvijas zemnieka dzīvojamās ēkas aprakstu nevar uzskatīt par drošu vēstures liecību.

Daži dati par Vidzemes zemnieku dzīvojamām ēkām atrodami Karlila 1664. gada ceļojuma aprakstā. Autors braucis no Pliskavas uz Rīgu.³⁹ Viņš žēlojas, ka izpostītajā Vidzemē zemnieku sētās nācies iekārtot gulvietas vai nu šķūņos (klētīs?) vai dūmu istabās.⁴⁰ Toties pavāram Vidzemē bijušas lielākas ērtības. Krievijas daļā ēdiens bijis jāgatavo teltī, turpretim Vidzemē arvien izdevies atrast vai nu virtuvi, vai vismaz šim nolūkam uzceltas būdas (namiņus?).⁴¹

Citi tā laika ceļojumu apraksti ēku pētīšanai dod vēl mazāk noderīgu ziņu.⁴² Tā Lentilija aprakstā nekas noteikts nav atrodams.⁴³ Pieminams tikai novērojums, ka zemnieki krāsniņi lietojot tiklab telpu apsildīšanai, kā maizes cepšanai un dažreiz uz tām pat gulot. Šādas krāsniņi atšķiroties no vāciešu krāsniņiem, kas Zemgalē visumā esot tādas pašas kā Vācijā. Zemgales zemnieku istabas salīdzinātas ar pirtīm un dēvētas par dūmu kambariem.⁴⁴

No apraksta var spriest, ka zemgaliešiem šai laikā bijušas īpašas dzīvojamās ēkas, jo aprakstā vēl īpaši minētas pirtis, rijas un klētis.

Einhorna latviešu zemnieka dzīves apraksts nav saistīts ar noteiktu laikmetu. Autors cenšas izcelt vāciešu lomu Baltijas zemju kultūrā un aprakstīt vecākās latviešu celtniecības parašas. Pēc raksta nav nosakāms, cik lielā mērā tās saglabājušās Kurzemē līdz 17. gadsimtam. Einhorns raksta, ka istabas krāsnis un stikla logus latvieši esot aizguvuši no vāciešiem. Latviešu mājās bijušas tikai maizes cepamās krāsnis un logu vietā ar koka aizbidņiem noslēdzami caurumi sienās.⁴⁵ Šīs Einhorna piezīmes chronoloģiski ir visvecākās. Domājams, ka tās būs pazinis tiklab Brands, kā Lentilijs un ka tās būs ietekmējušas viņu Kurzemes un Zemgales zemnieku māju raksturojumus. Einhorna apgalvojums, ka latvieši istabas krāsnis un stikla logus aizguvuši no vāciešiem, vien jau liecina, ka šai laikā Kurzemes zemnieku mājās tādas krāsnis un logi jau bijuši.

Lauku apbūves raksturošanai Kurzemē, Zemgalē un Vidzemē 17. gadsimta vidū vēl var noderēt gleznotāja J. R. Storna kolorētie zīmējumi Meijerberga 1661. gada ceļojumam cauri Latvijai uz Pliskavu un tālāk uz Maskavu.⁴⁶ Šajos zīmējumos stipri izceļas gleznieciskais elements. Ēkas attēlotas tikai visā kopumā, mazāka vērība veltīta sīkdaļām. Ar lielāku rūpību tēlotas vienīgi monumentalās celtnes, kā pilis un baznīcas. Zīmējumiem pievienoti tikai vietu nosaukumi bez sīkāka apraksta. Tādēļ ne vienmēr nosakāms, kas katra ēka ir, un samērā daudzie attēli dod tikai vispārīgu Latvijas lauku apdzīvoto vietu raksturojumu.

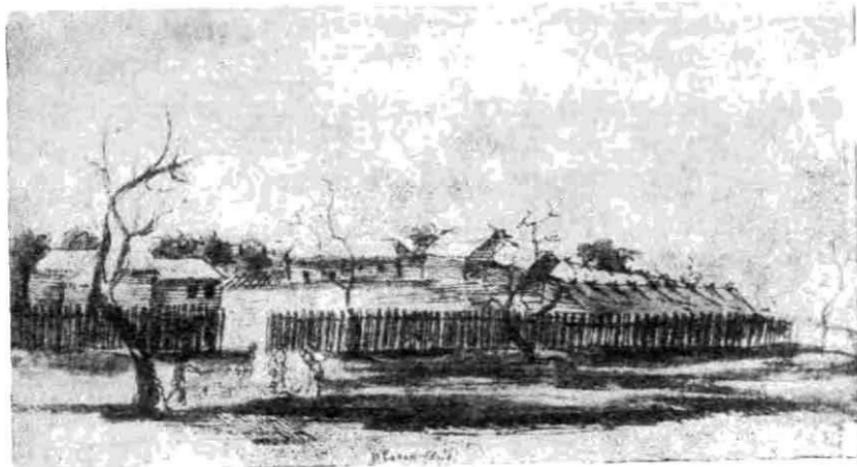


1. attēls.

Meijerberga albumā ir divu Latvijas pilsētiņu — Kokneses un Alūksnes attēli. Kokneses skatā atsevišķas mājas nav labi saredzamas, toties Alūksnes attēls labi parāda šo mazo pilsētiņu apcietinātās pils tuvumā. Kara gados Alūksne gan stipri izpostīta, kas minēts arī paskaidrojumos pie zīmējuma.⁴⁷

1. attēlā parādīts šis Meijerberga Alūksnes attēls. Pils priekšā neapcietinātā pilsētiņa ar koka ēkām, kuras segtas ar lubām vai dēļiem (pēc krievu apdzīvoto vietu parauga). Pilī toreiz dzīvo krievu karaspēks, kas to priekš trim gadiem ar lieliem upuriem atņēmis zviedriem. Tilta galā iežogotajā daļā bijusi novietota kara transporta nodaļa. Pilsētiņā ir dažāda lieluma ēkas ar maziem lodziņiem. Priekšplānā ar galu pret ceļu redzama kāda īpatnēja ēka ar diviem lodziņiem uz ielas pusi, krastmalā slieteņa namiņš, no kura kūp dūmi.

Meijerberga albumā attēlota vesela virkne Kurzemes un Zemgales kroņa muižu, sākot ar Rucavu un beidzot ar Seci. Dažās muižās ir prāvas mūra ēkas (Emburgā, Iecavā), bet parasti saimniecības ēkas ir koka gulbūves ar divslīpu un četrslīpu salmu jumtiem. Rucavā redzamas dažas statņu būves. Arī muižu dzīvojamās ēkas ir koka gulbūves ar maziem lodziņiem, un ne visām tām ir dūmeņi. Raksturīgs Zemgales kroņa muižas (Platones) kopskats redzams 2. attēlā. Muižas apbūves komplekss iežogots ar sētu. Galvenajai dzīvojamajai ēkai vidū ir priekšnams, vienā galā dzīvojamā daļa, otrā — saimniecības telpas. Arī otra apdzī-



2. attēls.

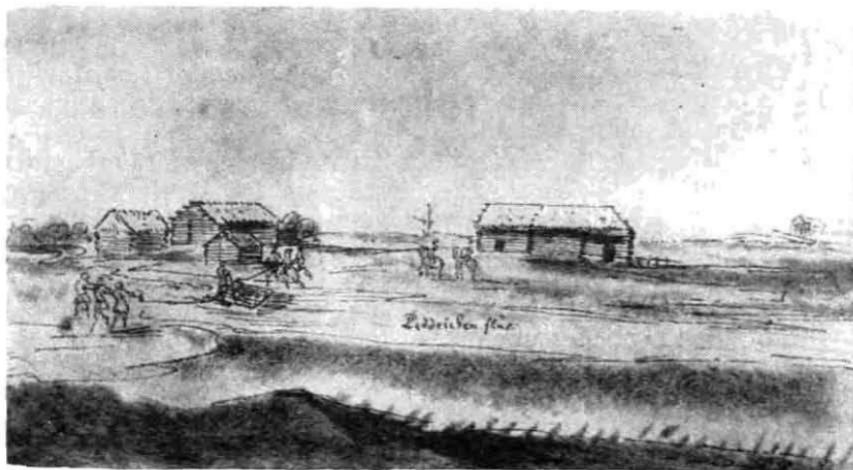
votā ēka (ērbeģis) ir dzīvojamo un saimniecības telpu apvienojums. Muižas pagalma zemākajā daļā gar sētu, liekas, ir kūtis. Kas pārējās divas ir par ēkām, nav īsti nosakāms.

3. attēls rāda Seces kopskatu. Visu muižas pagalmu aizņem mazas koka ēkas ar salmu jumtiem. Kā katru par ēku, zīmējumā nav nosakāms.



3. attēls.

Albumā zīmēti arī vairāki Kurzemes un Zemgales krogi un zemnieku mājas. Tās ir nelielas koka guļbūves ar salmu jumtiem, bez dūmeņiem. Dzīvojamo ēku logi laikam bijuši tik mazi, ka nav saistījuši gleznotāja uzmanību.



4. attēls.

4. attēlā redzama neliela apdzīvota vieta Tadaiku tuvumā. Priekšplānā pārceltuve pār upi. Attēla labajā pusē, liekas, ir rija ar īpašu piebūvi, kreisajā pusē — triju ēku grupa, kur lielākajai ēkai (krogam?) parādīta vidējā kapitālsiena, bet nevienai no tām nav redzams dūmenis. Meijerberga albumā ir vēl otrs stipri līdzīgs attēls, kas rāda zemnieku sētu Auces tuvumā. Abos attēlos ir brīvi sakārtotas ēku grupas, kādas tās vēl tagad var redzēt zemnieku sētās.



5. attēls.

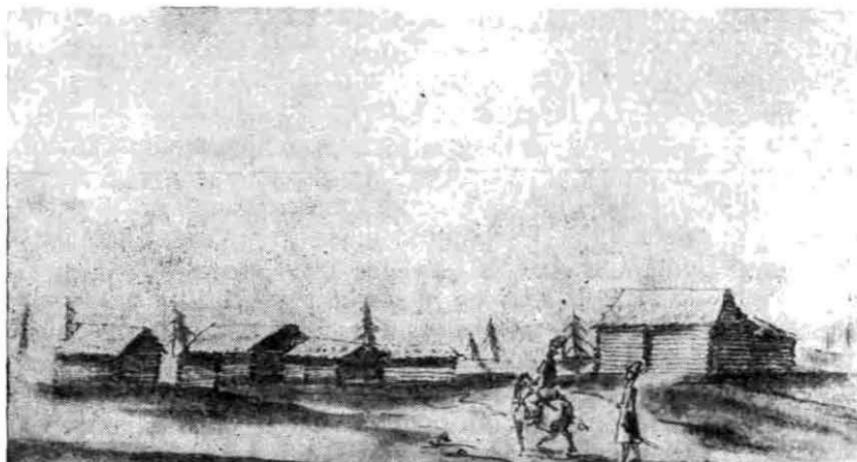
No Vidzemes 5. attēlā parādīts Bērzaunes ciema skats (Bersson ein Dorff in Liefflandt). Gleznotāja uzmanību visvarāk te saistījis kūpošais slietenis, kura tuvumā redzama grupa mazu koka ēciņu ar salmu jumtiem.

Zeltiņu ciems parādīts 6. attēlā. Tur redzamas vairākas augstas divdalījumu koka ēkas. Tās, domājams, ir dzīvojamās rijas, jo Zeltiņi agrāk bijuši igauņu apdzīvots pagasts.⁴⁸

Ja arī Meijerberga attēli nedod sīkus datus par ēkām, tad visumā tie labi raksturo 17. gadsimta lauku apdzīvotās vietas. Tiklab muižas, kā zemnieku sētas apbūvētas ar ļoti vienkāršām nelielām koka ēkām, kurām lielāko tiesu ir divslīpu salmu jumti. Dzīvojamām ēkām ir mazi lodziņi, un zemnieku ēkām nav dūmeņu. No šīs zemās apbūves dažās vietās izceļas kara laikā pa daļai izpostītās lielās muižnieku pilis.

Sakopotie apraksti pietiekami skaidri rāda, ka Vidzemes, Kurzemes un Zemgales muižu dzīvojamām ēkām ir tikai divas plānojuma schemas. Prāvākajām ēkām vidū ir priekšnams ar pa-

vardu un no tā uz abām pusēm pa vienai apkurināmai telpai ar lielāku vai mazāku skaitu neapkurināmu kambaru. Mazākajām ēkām ir asimetrisks veidojums: vienā ēkas galā tām atrodas priekšnams, otrā — istaba ar kambariem.



6. attēls.

Ne par Kurzemes un Zemgales, ne arī par Vidzemes zemnieku mājokļiem nav noteiktu ziņu ne arhivu materiālos, ne literatūras avotos. No sakopotajiem materiāliem tomēr var secināt, ka 17. gadsimtā zemnieku mājas Vidzemē bijušas ļoti nabadzīgas. Viņu istabas dēvētas par rijām. No muižu aprakstiem tomēr redzams, ka rijas nosaukums šai laikā lietots plašākā nozīmē, ne tik šauri, kā mēs to saprotam tagad. Ar rijas vārdu apzīmēta telpa, kurā bijusi no apsildāmās telpas kurināma krāsns. Par riju tādēļ saukta arī tā dēvētā zemnieku dūmu istaba. Tāda dūmu istaba, gan kā vientelpa, gan kopā ar tai pievienoto kambari, 17. gadsimtā būs bijusi vismaz viens no Vidzemes zemnieku dzīvokļa tipiem. Tām kā papildinājums zemnieka sētā bijusi savrup celtā virtuve — namiņš, vasaras guļamtelpa — klēts un mazgāšanās telpa — pirts.

Muižu revīziju materiālos un ceļotāju aprakstos, atskaitot jau sīkāk iztīrīto Branda tekstu, nav tieši minēta dzīvojamā rija. Tomēr dūmu istabas un rijas kopīgais nosaukums muižu ēku aprakstos liek domāt, ka Vidzemē šai laikā zemnieka mājokļa un rijas apvienojums nav bijis retums.

Vidzemes aprakstos dūmu istaba bez stikla logiem izcelta kā

zemnieku mājokļa raksturīga pazīme, tomēr muižas amatniekiem jau celtas istabas ar krāsnīm, kas bijušas kurināmas no priekštelpas. Protams, ka šāda veida mājoklis varēja ieviesties arī dažu muižu zemnieku sētās. Tāda mājokļa programā tad ietilpa šādas trīs telpas: priekšnams, istaba un kambaris. Ja šādas zemnieku mājas Vidzemē arī būtu bijušas, tad to izplate tai laikā tomēr nav bijusi liela, jo tur vēl 19. gadsimta sākumā krāsnis lielāko tiesu kurinātas no apsildāmās telpas. Arī kambari būs bijuši tikai re-tumis, jo 18. gadsimta beigās pat Rīgas pilsētas zemnieku mājās kambari aiz istabas nav droši konstatējami.

Par Kurzemes un Zemgales zemnieku dzīvojamām ēkām no šā laika drošu ziņu nav. Zemnieku dzīves līmenis gan tur katrā ziņā ir bijis augstāks nekā Vidzemē, tomēr dūmeņu arī viņu mājām šai laikā nav bijis. Par dažādo krāšņu tipu izplati īsti drošu ziņu nav. Domājams, ka dažās vietās arī Kurzemē un Zemgalē būs vēl bijušas dūmu istabas, jo Einhorns, Lentilijs un Brands tās piemin. Taču Einhorna prātojumi par vāciešu kultūras misiju latviešu mājokļu pārveidošanā un neskaidrības Branda Kurzemes dzīvojamās ēkas aprakstā liecina, ka ap 17. gadsimta vidu vīsmaz vienai latviešu zemnieku daļai jau ir bijušas istabas ar krāsnīm, kas kurinātas no nama puses. Arī tas, ka šāds dzīvojamās ēkas izveidojums 19. gadsimta sākumā Kurzemē un Zemgalē ir jau vispārīga parādība, apstiprina, ka tādās apkures ietaisēs izpaužas jau vecākas tradīcijas.

Vidzemē svarīgs zemnieku mājas papildinājums ir savrupais namiņš. Tas redzams Meijerberga ceļojuma attēlos un minēts arī Karlila ceļojuma aprakstā. Kurzemē un Zemgalē šāds namiņš nav minēts. Tādēļ domājams, ka ap šo laiku Kurzemes zemnieku mājā nams un istaba jau būs bijuši apvienoti vienā ēkā. Brands Kurzemes zemnieka mājas aprakstā piemin arī kambari. Visai ticams, ka lielāku saimnieku mājās Zemgalē jau šinī laikā ir bijušas trīs telpas: nams, istaba un kambaris.

Vidzemē zemnieku mājām nav bijis stikla logu. Kurzemē un Zemgalē ap šo laiku sāk rasties stikla cepļi, tāpēc logu stikli varēja jau parādīties arī zemnieku mājās.⁴⁹ Uz to norāda arī Einhorna prātojumi, ka latvieši stikla logus aizguvuši no vāciešiem.

Par Latgales zemnieku ēkām 17. gadsimtā izlietojamus materiālus nav izdevies atrast.

Arī par šā laikmeta Latvijas pilsētu mazākām ziņās ir visai trūcīgas. Rīgas pilsētas mērniecības arhīvā no 17. gadsimta beigām atrodami vairāki plāni ar aksonometriskiem mazēku skatiem. Tādā veidā attēlotas mazas priekšpilsētu mājiņas tiklab lielākos gruntsgabalos, kā tā dēvētajās slabadās, kurās iedzīvotājiem

(Slabodschen) nav ne savas nožogotas sētas, ne dārza, bet ir tikai pilsētas nomalē saceltas mazas dzīvojamās ēciņas. Šajos mērnieku plānos ēkas zīmētas schematiciski. Tur nekas vairāk nav parādīts kā tikai ēkas tipa schema, bet, materialam vispār trūkstot, arī tā ir vērtīga, it īpaši vēl tādēļ, ka dažos plānos atrodami norādījumi par ēku lietošanu un to īpašnieku.

7. attēls rāda izgriezumu no Rīgas tagadējā Maskavas rajona nomales 1695. gadā.⁵⁰ Tikai divām ēkām šai plānā ir īpaši uzdevumi: ar «C» apzīmētā ēka ir iesalnīca, bet ar «H» apzīmētā — dzīvokļa un pirts apvienojums. Visas pārējās ir vienkāršu amatnieku (liģeru, audēju, podnieku) dzīvojamās ēkas. To izveidojumā var saskatīt vairākus tipus. Ekām «A», «B» un «H» ir nesimetriska ieeja no sāniem, blakus ēkas galam, un plašāka istaba ar diviem logiem un varbūt ar kambari; «D» un «J» ir tā paša tipa ēka ar mazāku dzīvojamo telpu un ar vienu logu; «F» rāda ēku ar vidējo ieeju un telpām tās abās pusēs. Viss var būt, ka šim tipam pieskaitāmas vēl arī «L» un «M» ēkas. «K» rāda vecu ēkas tipu ar gala ieeju.



7. attēls.

8. attēlā parādīts strādnieku ciems tai pašā rajonā 1693. gadā (Schlabodschen auff Lepingskalln).⁵¹ Šā ciema iemītniekiem visbiežāk ir tikai viņu mājeles bez pagalma vai dārza (mazi dārziņi ir tikai «i» un «w»). Raksturīgi, ka te gandrīz visas ēkas pieder pie tipa ar nesimetrisku ieeju no sāniem. Dažām ēkām pret ceļu vērsti tikai viens vai divi logi, bet ieeja domājama no smilšu kalnu puses. «J» un «F» mājām blakus vēl ir pirtis.



8. attēls.

9. attēls rāda izgriezumu no Ķīpsalas apbūves 1694. gadā.⁵² Tur uzceltajām dzīvojamām ēkām ir jau pagalmi un iežogoti dārzi. Eku lielākā daļa atkal pieder pie tipa ar malējo nesimetrisko ieeju un vienu tai blakus ietaisītu logu. Vienai ēkai («L») ieeja ir no aizmugures, vienai («B») ieejas malā nav logu, un kādai citai («G») ieejas malā ir divi logi.



9. attēls.

10. attēlā redzama plašākas mazēku kolonijas daļa Pārdaugavā, gar tagadējo Ūdens ielu. Plāns zīmēts 1690. gadā.⁵³ Šai plašajā plānā, kas aptver 51 apbūves gabalu, trīsdesmit četros parādītas nelielas ēkas ar divslīpu jumtiem un malējo nesimetrisko ieeju. Ieejai blakus ietaisīta viena loga aila, otra aila — gala skatā. Pie šā paša tipa pieder vēl 3 ēkas ar divām logu ailām blakus durvīm. Viena ēku daļa — 11 ēkas, ir pagrieztas pret skatītāju ar pretskatu, kur ēkas sānos redzami tikai divi logi, bet gala skatā viens logs. Domājams, ka šīs ēkas pieder pie jau iepriekš minētā tipa, un tādai ēkai pavisam ir 3 vai 4 logi un vienas durvis. Tikai trīs ēkas ir ar vidējo ieeju, kurai abās pusēs ietaisīts pa vienam logam.



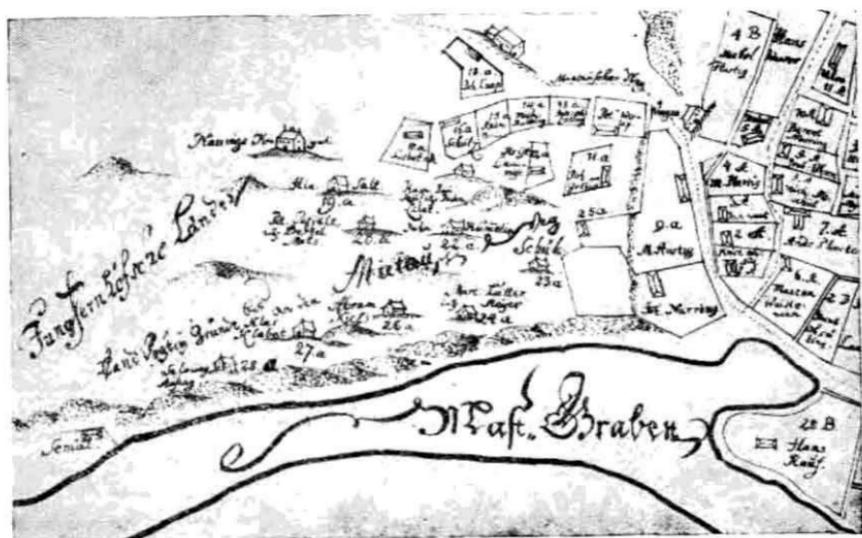
10. attēls.

Par šo ēku iekšējo plānojumu un izveidojumu mērnīku plānos sīkāku datu nav. Dūmeņi nav parādīti, un nav arī noteicams, vai tie šīm ēkām maz ir bijuši. Viss var būt, ka nomalēs lielākā dzīvojamo ēku daļa 17. gadsimtā ir bijusi bēz dūmeņiem. Visas šīs mazās ēciņas ir stipri līdzīgas Broces Pārdaugavas attēliem no 18. gadsimta beigām, kur tās tēlotas ar divām telpām bez dūmeņiem.⁵⁴ Šīm Broces ēkām ir tāda pati malējā ieeja no ēkas sāniem. Tādēļ var domāt, ka arī šais mērnīku plānos zīmētajām ēkām vienā galā ir priekštelpa — virtuve un blakus tai viena

istaba. Lielākām ēkām aiz istabas var būt bijis vēl arī kambaris.

Arī otrs tips ar vidējo ieeju pazīstams no Broces attēliem. Tam ir vidējā priekštelpa — virtuve un abās pusēs tai pa vienai telpai.

11. attēlā parādīta 1734. gadā papildinātā kopija no 1688. gadā uzmērītā Kobronskanstes rajonā.⁵⁵ Tur pie Jelgavas ceļa ir maza pārcēlāju dzīvokļa kolonija un Pusāķa kalnā mazturīgāko pilsētas iedzīvotāju apmetne bez ielām, pagalmiem un dārziem. Vecākajā plānā šai apmetnē ir 6 mazas mājiņas ar ieeju no gala un vienu logu malas sienā. Tikai vienai mājiņai ir vidējā ieeja un tai abās pusēs pa logam. Tieši pie Jelgavas ceļa ir lielāka šāda paša tipa ēka ar diviem logiem katrā durvju pusē. 1734. gada šīs pilsētas daļas plānā vienai šādai mazai ēkai parādīts dūmenis.



11. attēls.

Mazēkas tips ar ieeju no gala vēlāko gadu plānos nav vairs vērojams, bet tas bieži atkārtojas 1612. gada N. Mollīna vara grebumā.

Sis Mollīna vara grebums ir visvērtīgākais materials par Rīgas pilsētu un tās apbūvi 17. gadsimtā. No tā četrām lapām Rīgas vēstures muzejā ir saglabājušās gan tikai trīs. Tās rāda Rīgu brīvi attēlotā putna perspektīvā. Grebums izstrādāts lielā formatā (minētās 3 lapas kopā aptver 34×125 cm). Tur daudz datu par Rīgas pilsoņu ikdienas dzīvi, kas attēlojumam piešķir

lielu ticamību. Rīgas skata vidējā daļā atrodas nocietinājumos ieslēgtā pilsēta. Pa kreisi un pa labi no tās redzamas pilsētas nomales. Arī Pārdaugavas krastā parādīta pilsētas nomaļu apbūve. Attēls nav darināts uz ģeometriski pareiza pilsētas un apkārtnes plāna. Tas ir brīvs stāstījums par Rīgu attēla veidā. Visi priekšmeti šai grebumā, to starpā arī ēkas, zīmēti ļoti sīki un ticami, tomēr ēku uzdevumi un to plānojums no ārpuses vien nav nosakāmi. Tādēļ ne visi attēlotie plāna elementi tagad pilnīgi saprotami un izskaidrojami.

Mollīna grebuma oriģināls ir kļuvis jau tumšs un maz piemērots reprodukcijām mazā mērogā. Vispārīgam pārskatam 12. attēlā pievienota Broces zīmēta kopija.⁵⁶ Tā rāda Mollīna vara grebuma apakšējo, interesantāko daļu. Pievienotie un tālāk aprakstītie izfotografējumi no oriģināla lielākā mērogā dod iespēju atsevišķas vietas apskatīt visos sīkumos.

Mollīna vara grebumā redzamas daudzas Rīgas nomaļu ēkas. Par tām līdz šim nav nekādu aprakstu. Daži literatūras dati raksturo vienīgi pilsētas centra ēkas, bet arī tie ir tikai no 18. gadsimta. O. Hūns savā 1798. gada Rīgas aprakstā aizrāda, ka Vecpilsētā ēkām apakšējos stāvos parasti esot saimniecības telpas, bet dzīvojamās telpas atrodoties otrā stāvā.⁵⁷ Par Rīgas dzīvojamo ēku vecākajām celtniecības parašām stāsta arī Broce: «... Katrs turēja savas preces priekšnamā, kur sakravāja kaņepājus un linus. Nama augšējā daļā cits virs cita bija ierīkoti vairāki bēniņi preču nokraušanai, nedaudzās dzīvojamās telpas bija ierīkotas sētas pusē... Šī priekšnama aizmugures kādā kaktā atradās virtuve, kādu vēl tagad var atrast šādos nepārtaisītos namos.»⁵⁸ Piemērs šādam vecam Rīgas tirgotāju namam atrodams H. Mēlbarta rakstā par Rīgas dzīvokļu būvniecību.⁵⁹ Šādi ēku tipi plaši izplatīti arī citās Hanzas pilsētās un aprakstīti literatūrā.⁶⁰

Rīgas tirgotāju un amatnieku dzīvokļu kultura 17. gadsimtā ir maz izkopta. Vēl 1728. gadā katrā dzīvojamā ēkā vidēji ir tikai 1,5 istabas un 2,1 kambaris. Mazturīgākajiem iedzīvotājiem ir tikai viena istaba un ne katram pie tās ir kambaris.⁶¹ Tā laika Rīgas pilsētas ēkas tāpat vispār ir mazas. Pie parastajām mazākām, kas apskatītas šīnī pētījumā, tās nav pieskaitāmas vienīgi tādēļ, ka tanīs apakšējā stāvā ir telpas tirdzniecībai un amatniecībai.

Šāda Vecpilsētas apbūve parādīta 13. attēlā, kas rāda Mollīna grebuma daļu Daugavmaļas tuvumā starp Doma un Jēkaba baznīcu.⁶² Pilsētas plāns ap Doma baznīcu vēlāk stipri pārveidots. Doma baznīcas torņa pakājē redzami triju ļoti tipisku tā laika ēku preskali, ar durvīm apakšstāvā, ar vienu vai diviem logiem otrā stāvā un ar maziem lodziņiem jumta stāvā. Gar ielām sacel-

tās ēkas attēlotas schematiski, bet visumā tās atkārtō jau minēto tipu. Raksturīgi šo ēku lielie dūmeņi un to brīvais novietojums jumtu slīpēs.

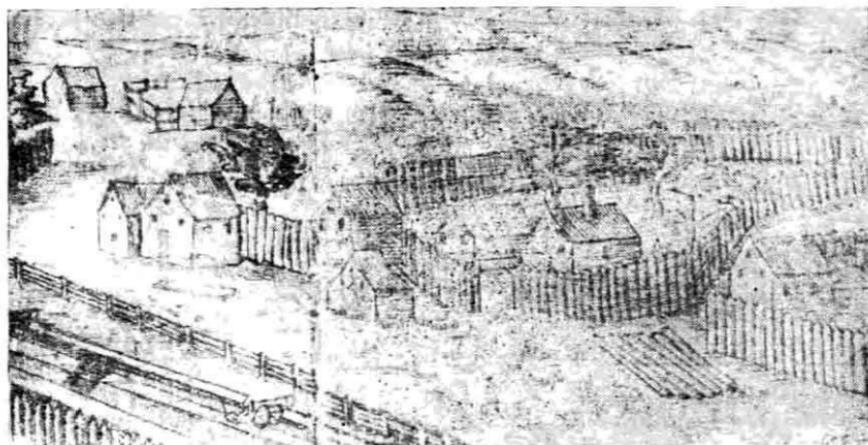
Pilsētas centralajās daļās grebuma autoru ir ierobežojis pilsētas ielu tīkls. Nomalēs viņš rīkojies daudz brīvāk, un attēli tur ir skaidrāki. Pilsētas kopskata kreisajā stūrī, blakus pilsētas ga-



13. attēls.

nībām, parādīta izklaidēta nomaļu apbūve. Sevišķi sīki tā attēlota grebuma augšējā labajā stūrī. 14. un 15. attēls rāda šīs daļas palielinātā veidā.

14. attēlā aiz pilsētas nocietinājumiem redzamas trīs mazas mājiņas bez dūmeņiem ar ieeju no ēkas gala. Kas tās bijušas par ēkām, to var tikai minēt. Varētu būt, ka tās lietotas kādiem saimnieciskiem uzdevumiem (darbnīcām, noliktavām). Tālāk redzams iežogots dārzs ar divām ēkām. Vienai no tām ir dūmenis, divi lodziņi ēkas zelminī un viens logs sānskatā. Logu sakārtojums sienās nav īsti skaidri parādīts. Lodziņi zelminī, domājams, apgaismo noliktavas jumta telpā. Blakus dzīvojamai ēkai uzcelta saimniecības ēka, arī ar logiem ēkas zelminī. Attēla labajā stūrī redzama lielāka ēka ar logiem, bet bez dūmeņa; blakus tai mazāka ēka ar dūmeni. Domājams, ka lielākā ir kāda saimniecības ēka un tai līdzās uzcelta dzīvojamā ēka.



14. attēls.

15. attēls, kā redzams kopskatā, ir 14. attēla turpinājums uz labo pusi. Kreisajā stūrī tur redzama vienstāva dzīvojamā ēka, kas ietilpst tikko apskatītāja sētā. Tālāk atrodas iežogots apbūves gabals ar dārzu vidū, ar triju ēku grupu pret nocietinājumiem un divām ēkām pie ieliņas apbūves gabala aizmugurē. Pirmajā grupā galvenā ēka pievirzīta tieši pie laukuma, uz kura parādīta dēļu zāģētava. Domājams, ka šīs centralās ēkas priekšpusē ir kāda



15. attēls.

saimniecības telpa. Ēkai ir dūmenis un galā piebūvēts kambaris. Aiz dārza redzama maza mājiņa ar diviem logiem un dūmeni, tālāk īpatnēja ēka bez dūmeņa ar ieeju no gala.

Šīs mazās Rīgas ēkas rāda jau samērā izkoptu mājokļa programmu. Ēku vairumam ir dūmeņi un nelieli logi. Dūmeņu novietne mazās mājiņas vidējā daļā liecina, ka tanī iekārtotas vismaz divas telpas. Dažām ēkām ir vēl piebūves, kas varētu būt dzīvokļa paplašinājums — kambaris. Tāpat kā pilsētas divstāvu ēkām arī



16. attēls.

šīm mazajām nomaļu ēkām vairākos piemēros ieeja ir no gala. Šis tips, kā jau teikts, 1688. gadā redzams arī Pusāķa kalna apmetnē, bet pēc tam Rīgas nomaļu apbūvē tas vairs nav manīts. Domājams, ka šīnī ēkas uzbūves formā izpaužas kādas vecākas mājokļa celtniecības tradīcijas, kas saistītas ar pilsētu amatnieku mājām, ar darba telpu ielas pusē. Uz to norāda arī T. Krauzes Jelgavas 1652. gada plāna dati. Vairākām dzīvojamām ēkām Mollina grebumā ieejas nav redzamas un nav arī nosakāma to

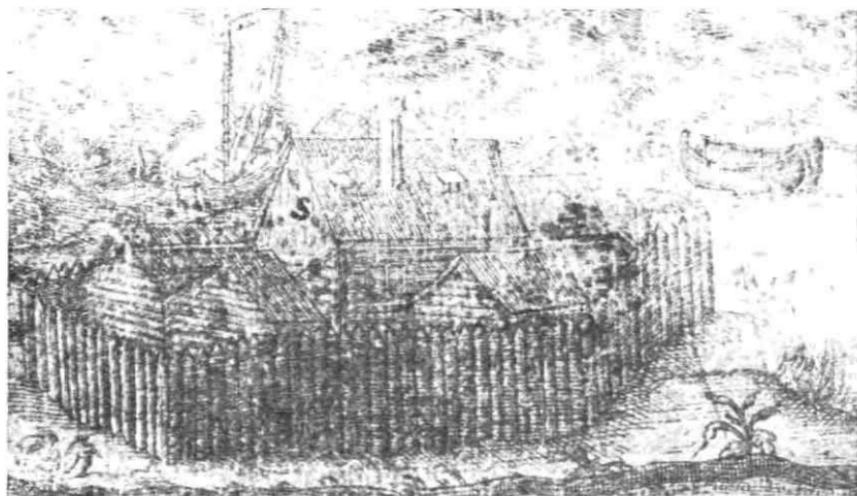
atrašanās vieta. Šo ēku kopveidojums rāda iespēju, ka ieeja tām ietaisīta jau no sāniem un ka ēkā ir priekšnams ar virtuvi un istaba.

Rīgas Pārdaugavas nomale ir laucinieckāka. Mazās mājiņas tur rādītas kā koka gulbūves; daļa no tām segta ar lubu jumtiem. Mollīna grebuma Pārdaugavas daļā daudz apbūves elementu, ko pēc attēliem vien grūti izprast un izskaidrot.

16. attēlā redzamas divas koka ēkas uz Daugavas salas pie pārceltuves. Vienai no tām, ar gala ieeju, abās pusēs ir lieveņi. Vairākas šādas koka ēkas, kā rāda kopskats, uzceltas vēl arī citās Daugavas salās.

Pārdaugavas mazās koka ēkas visumā atkārtoto tos pašus tipus, kas apskatīti jau Daugavas labajā krastā. Citādāks te tikai būvmaterials un mājām trūkst dūmeņu.

Pārdaugavā vairākos piemēros redzamas arī lielākas ēkas ar dūmeņiem un jumta logiem. Vara grebumā šo ēku lielums pārspīlēts, lai izceltu atšķirību starp lielākajām un mazākajām ēkām. Ja sīkāk aplūko šo prāvāko ēku daļas, kā durvis, logus un stāvu augstumu, tad izrādās, ka arī šīs ēkas ir nelielas un no jau apskatītajām ēkām visvairāk atšķiras ar savu dziļumu, kas izpaužas augstākos jumtos. Viena šāda prāvāka ēka redzama 17. attēlā

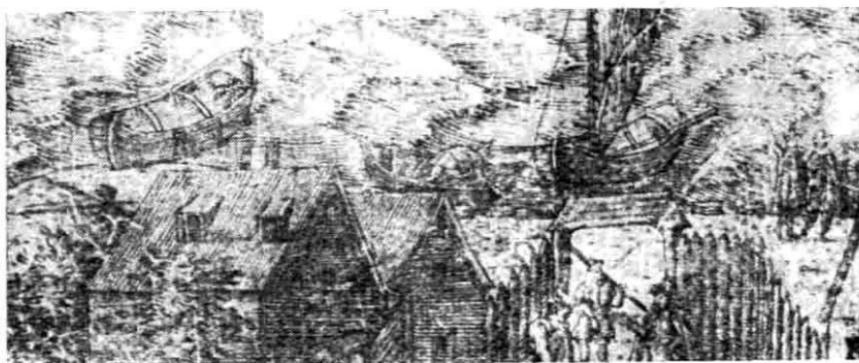


17. attēls.

plašāka apbūves kompleksa vidū. Ēkai vienā galā neliela piebūve. Tā atkārtojas arī divos citos šā tipa piemēros. Raksturīga prāvāku ēku grupa parādīta arī 18. attēlā. Par to uzdevumiem un lieto-

šanas veidu noteiktu norādījumu nav. Tomēr vienādu ēku atkārtotā vairākās Mollīna vara grebuma vietās liek domāt, ka tie attēli rāda parastu dzīvojamās ēkas tipu, kas izrādījies par nodēriģu arī dažādiem citiem uzdevumiem. Pie dažām ēkām redzamā piebūve ir radusies vēlāk, kā ēkas paplašinājums.

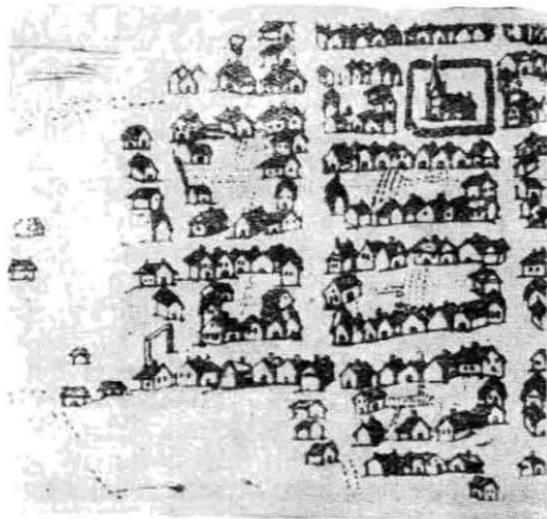
Apskatot sīkāk Mollīna vara grebumā attēlotās lielākās ēkas, vērojams, ka parasti tām vienos sānos ir divi logi, otrs sānos vienā piemērā redzams logs un durvis. Vara grebuma kopattēla apakšējā labajā stūrī ir viena šā prāvākā tipa ēka ar durvīm no gala. Pēc būvķermeņu uzbūves vērojams, ka arī šais prāvākajās ēkās atkārtojas jau apskatītie Rīgas nomaļu ēku plānojuma pamattipi. Vienai ēku daļai ielas vai ceļa pusē ir tirdzniecības vai amatniecības telpas, bet dzīvojamās telpas atrodas aiz tām. Dažām citām ēkām, ar ieeju no sāniem, pie ieejas ir priekštelpa ar virtuvi, blakus tai istaba. Dažos piemēros ēkas galā redzams vēlākā laikā piebūvēts kambaris. Šo prāvāko ēku dziļums ir tāds, ka līdzās istabai var ietaisīt vēl sānu kambarus. Logi jumtā un zeltmiņos liecina, ka arī jumta telpa tiek lielā mērā izlietota, domājams, noliktavu vajadzībām. Ievēribu pelna ēku lielie dūmeņi, kas brīvi rēgojas jumta slīpēs. Tie rāda, ka apkures ietaises nav ēkas vidū, bet vienā malā. 17. gadsimta ēkām vēl ir vajējie pavardi, un arī labākajās ēkās krāsnis kurina no īpašām apkures telpām ar apvalkdūmeņiem vai rovjiem. Tiem ir ļoti vienkārši no koka un no māliem izveidoti dūmeņi. Tādi tie būs bijuši arī Pārdaugavā redzamajām ēkām.



18. attēls.

Bez aprakstītā Mollīna grebuma no 17. gadsimta ir vēl citi Rīgas attēli, bet nomaļu ēku zīmējumi tur stipri schematiski un tādēļ Latvijas pilsētu apbūves pētīšanai maz ko dod.⁶³

Par ēkām pārējās pilsētās šai laikmetā ziņas ir visai trūcīgas. K. Bornmanis savā dzejolī par Jelgavu raksta, ka tur 17. gadsimta otrā pusē bijušas gandrīz vienīgi koka ēkas. Pilsoņu mājās bijusi istaba, kambaris un virtuve. No saimniecības telpām minēts pagrabs, klēts un stallis.⁶⁴

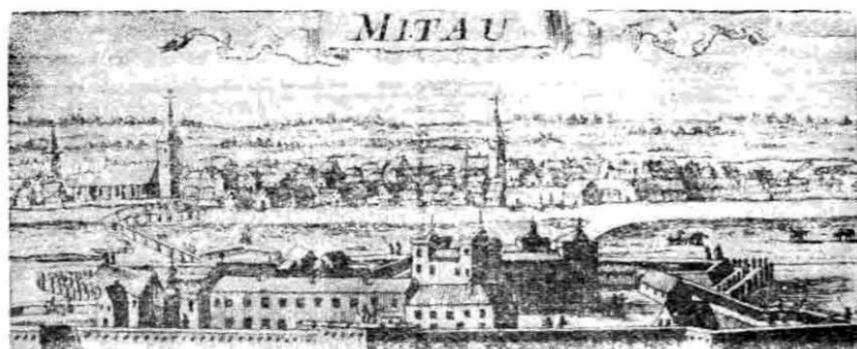


19. attēls.

Jelgavas apbūvi 1652. gadā rāda aksonometriskā attēlā mērnieka T. Krauzes izstrādātais pilsētas plāns.⁶⁵ Nomaļu kvartālos, no kuriem viens izgriezums parādīts 19. attēlā, saskatāmi divi galvenie dzīvojamo ēku tipi. Tāpat kā Mollīna Rīgas attēlos tur ir vienstāva ēkas ar ieeju no gala, divslīpu jumtu un dūmeni. Gar galvenajām ielām ēkas novietotas ar zelmiņiem pret ielu. Ieejas no gala ir tiklab ielas, kā pagalma skatos. Dažviet ēkas gala skatā, tāpat kā Mollīna Rīgas attēlos, virs durvīm ietaisīti divi mazi logi. Otram, retākajam tipam, ieeja ir sānu sienas vidū. Mazākajām šā tipa ēkām sānos logu nav, bet tikai galos; prāvākajām ēkām blakus durvīm katrā pusē ir pa vienam logam. Nomaļu kvartālos parādītas ēkas ar četrslīpu jumtiem bez dūmeņiem, domājams, tās ir saimniecības ēkas.

Jelgavas apbūve 18. gadsimta pirmajos gados attēlota vēl grafa A. B. Horna vara grebumu kopojumā.⁶⁶ Jelgavas kopskata centrālā daļa parādīta 20. attēlā.⁶⁷ Kā redzams, šis kopskats daudz mazāk noderīgs Jelgavas apbūves pētīšanai nekā mērnieka T. Krauzes plāns. Zīmējumam nav ne perspektīviskā, ne akso-

nometriskā dziļuma, ēkas nav rādītas samērīgas ar to patiesajiem lielumiem; pat tik ievērojamas celtnes kā baznīcas nav attēlotas pareizi. Bet šinī Jelgavas kopskatā tomēr saskatāmi vairāki dzīvojamo ēku tipi. Tiem ir lielāka ticamības pakāpe. Ja šīs ēkas arī nebūtu atradušās attēlā parādītajās vietās, tad tomēr tās uzskatāmas kā laikmetam raksturīgi pilsētu apbūves elementi. Jelgavas kopskatā visvairāk izceļas divi ēku tipi. Pilsētas centralajā daļā ir prāvākas (tirgotāju²) ēkas ar ieeju no gala un ar 3 lodziņiem ēkas zelmīnī (noliktavu telpas divos stāvos²). Ēkām sānskatos tuvu pie jumta pārkāres ir mazi lodziņi. Nomalēs parādītas mazas (amatnieku²) ēciņas ar dūmeņiem un ar 2—3 logu ailēm sānskatā. Pilsētas centralajā daļā ēkām ir stāvi divslīpu jumti, bet nomalēs arī četrslīpu. Ēku attēli rāda visumā tos pašus tipus, kas jau apskatīti Rīgā.



20. attēls.

Pilsētu mazēku attīstības vēsturē 17. gadsimta beigas iezīmējas ar jauniem ēku tiem. Vecākais mazēku tips ir izveidojies nocietinātās pilsētās, kur ēkas novietotas gar ielām uz šauriem apbūves gabaliem; tur gar ielu rindojas ēku zelmīni. Šis pats tips bija redzams arī nenocietinātajās priekšpilsētās. Tādai dzīvojamai ēkai, kas uzcelta pilsētas amatnieka vai tirgotāja vajadzībām, telpa ielas pusē ir darba telpa, bet dzīvojamā un guļamā telpa atrodas dziļāk pagalma pusē. Rīgas un Jelgavas piemēri rāda šādas mazēkas ar 2—3 telpām. Šīm ēkām ir jau dūmeņi un nelieli, tuvu griestiem ietaisīti logi. Par apkures ietaisēm sīkāku ziņu trūkst. Viss var būt, ka tāpat kā muižu ēkās priekštelpā ir vaļējs pavards ar rovi, kas papildināts ar dūmeni. Istabas krāsnī šai laikā kurina no priekštelpas. Dažām ēkām uzceltas piebūves. Tās varētu būt mājokļa paplašinājums — kambaris.

17. gadsimta beigās pilsētas nomalēs šā ēkas tipa vietā rodas cits ar ēkas novietni līdztekus ielai. Arī ieeja šādā ēkā ietaisīta nevis no gala, bet parasti pagalma pusē no sāniem. Mazām nomaļu ēkām vienā galā ir priekšnams, otrā istaba. Dažkārt lielākām ēkām ir vēl īpašas piebūves — kambari. Nomalēs redzamas arī nedaudzas prāvākas ēkas ar vidējo priekšnamu un telpām ēkas abos galos. Varētu domāt, ka šādu tipu ieviešanās saistīta ar mazturīgāko pilsoņu dzīvokļiem īpašās savrupēkās ārpus pilsētas nocietinājumiem. Darba telpas viņiem ir citur, un savu māju viņi ceļ pēc zemnieku parašām tiklab ēkas plānojuma, kā uzbūves ziņā. Šīm vienkāršajām ēkām nav dūmeņu, tādu tām nav arī Rīgas nomalēs pat 18. gadsimta beigās.

PIEZĪMES

¹) 7. nodaļa no plašāka darba «Atsevišķas nodaļas no Latvijas PSR mazēku vēstures». Pārējās nodaļas: 1. Rīgas priekšpilsētu mazēkas XIX gadsimta otrajā pusē un XX gadsimta sākumā; 2. Latvijas zemnieku dzīvojamās ēkas XIX gadsimta otrajā pusē un XX gadsimta sākumā; 3. Vasarnīcu mazēkas Rīgas Jūrmalā; 4. Latvijas pilsētu mazēkas XVIII gadsimta beigās un XIX gadsimta sākumā; 5. Latvijas zemnieku dzīvojamās ēkas XVIII gadsimta beigās un XIX gadsimta sākumā; 6. Mazēkas Latvijas muižu apbūvē XVIII gadsimta beigās un XIX gadsimta sākumā.

² Sebastian Münster, *Cosmographie*. Basel, 1550.

³ E. Winkelmann, *Bibliotheka Livoniae Historica*. 2. Aufl. Berlin, 1879. Nr. 5921: Eine anscheinend von Grafen A. B. Horn angelegte Sammlung von 14 Kupferstichen. Valsts bibliotēkas retumu nodaļā glabājas iesiets eksemplārs ar lielāku vara grebuma skaitu, nekā tas minēts Vinkelmaņa bibliografijas rādītājā.

⁴ Я. Зутис, *Очерки по исторнографии Латвии*. Рига, 1949. гл. II.

⁵ Vidzemes saimniecības vēstures avoti, 1553.—1618. g. Rīgā, 1941. g., 201.—202. lpp.

⁶ P. Drachenfels, *Atmiņas*. *Baltische Monatsschrift*, 1888. Citēts no J. un K. Straubergi, *Džūkste*. 447.—452. lpp.

⁷ J. Straubergs, *Sīpeles pagasts senas dienās*. Rīgā, 1936. g., 53. lpp.: *Sīpeles muižas dzīv. ēka 1720. g.*; J. un K. Straubergi, *Bēzrmuiža un viņas vēsture*. Rīgā, 1939. g., 169.—171. lpp. *Bēzrmuižas dzīv. ēka ap 1747. g.*; J. un K. Straubergi, *Džūkste. Pagasta un draudzes vēsture*. Rīgā, 1939. g., 383.—384. lpp.: *Pienavas muižas dzīv. ēka 1716. g.*; turpat, 381. lpp.: *Kazupes muižas vecā neapdzīvojamā ēka 1801. g.*

⁸ Turpat, *Bēzrmuiža 1747. g.*, *Kazupes m., Pienavas m.*; ēkas otrā galā istabas — *Džūkstes mācītāja m. 1683. g.*, *Sīpeles m. 1720. g.*

⁹ Turpat, *Džūkstes māc. m.*, *Džūkstes apr.*, 451. lpp.

¹⁰ Turpat, *Sīpele, Bēzrmuiža*.

¹¹ Pēc vēsturnieces M. Aboliņas Valsts archīvā savāktajiem nepublicētajiem materiāliem (*Inventaria der Königlichen Güter*, 1688).

¹² J. un K. Straubergi, *Džūkste*, 26. lpp.

¹³ J. un K. Straubergi, *Džūkste*, 384.—385. lpp.

14 J. un K. Straubergi, Bērmuiža, 168. lpp.

15 J. Straubergs, Sīpeles pagasts, 53. lpp.

16 J. un K. Straubergi, Džūkste, 385. lpp.

17 No vēsturnieces M. Āboliņas savāktajiem, bet nepublicētajiem Valsts arhīva materiāliem.

18 Turpat, «Über der Küche im Vorhauß ist auch ein von Lehm und Holzwerk zum Dach herausgeführter schorstein.» Vēl sīkāks apraksts tāda dūmeņa izveidojumam atrodams Koku muižas dzirnavās (Ternis Mühle): «... der Schorstein ruhet an einer seite auf 1 Ständer, u. auf d. a. auf 1 gemauerten fuss, worunter die Küche ist.» (No vēsturnieka J. Jenša nepublicētajiem materiāliem.)

19 Vēsturnieces M. Āboliņas mat., Burtnieku, arī Vilzēnu muižas ērbeģis.

20 Par krogiem 17. gs. izmantoti vēsturnieka J. Jenša publicētie un nepublicētie materiāli, ko viņš savācis savam darbam — Vidzemes krogi XVII gadsimtenī, Valsts arhīva raksti. Pētījumi I. Rīgā, 1935. g. Ziņas par ēkām — 87.—88. lpp. Autoram laipni nodoti izmantošanai izraksti par krogu ēkām no pazudušajiem Valsts arhīva fondiem: Arklu revīzija Nr. 10 no 1688. g.

21 J. Jenša materiāli — Kokenhof, Beste Krug.

22 Turpat, Grackenhof — Maye Krug; Krug des Kö Guts Lubbonen: «Die Stube isto so nach Ahrt 1 Riehen gebauet»; Lieder — Tielen Krug.

23 Turpat, Lieder — Tielen Krug.

24 Liefelandische Landes-Ordnungen, Riga, 1707. 689. lpp.

25 Ar laipnu atļauju izmantoti vēsturnieka J. Jenša par dzirnavām savāktie un vēl nepublicētie 1688. gada materiāli — Arklu revīzijas Nr. 10.

26 Turpat.

27 Turpat, Sērmūkšu muižas dzirnavu ēku apraksts 1688. g.: «Ist 1 kleine Riehe, worin d. Müller wohnet, welche 3 faden ins quadrat aufgehauen, u. dem ansehen nach vor geraumer Zeit muss erbauet seyn. dieselbe sehr alt und keinen Wert zu setzen ist.»

28 Turpat, Ļaudonas muižas dzirnavās: «1 Riehe ohne dreschdiele oder Vorriehe ist 3 faden lang u. eben so breit, hat 1 dach v Lubben.»

29 M. Āboliņa, Matīšu draudze zviedru laikos, Valsts arhīva pētījumi, Rīgā, 1935. g., 121. lpp.

30 M. Āboliņas nepublicētie materiāli. Inventarium des Königl. Guhtes Klein Schmelling. 30. VI. 1688: — «Auf dem so genandten Rossdienst Lande eine Riehe, welche ein Einwohner bevohnet ... $5 \times 2\frac{1}{2}$ f... hat eine Stube, welche aber nach der Baurt art, in form einer Riehen besteht und al Ende derselben eine Kammer, tie thüre an der Riehe ist gut und brauchbar, wie dem auch die Kammer, mit einer guten thüre versehen, doch beide ohne Eysenwerck. In der Kammer ist ein fenster Licht von 12 Spiz Rauten, wovon aber 2 halbe Rauten in stücken.»

— «Noch ist eine Wohnung oder Gelegenheit, welche ein Hofes Schuster bewohnet. Das Wohnhaus ist von schlechtem Holze welches inveding und also Halb beschlagen ... 7×3 f... gantz untauglich. Vorhäußschen, eine undeutsche Stube oder Riehe, und am Ende derselben eine kleine Kammer.»

— Gütchen Creijan 29. VI. 1688: «Eine Neue und nur vor 2 Jahren von schlechten Bürcken holz unter einem Strohdach in Norcken 5 faaden lang und $2\frac{1}{2}$ faaden breit aufgehauene Riehe, hat keine Vorriehe, sondern nur eine kleine Kammer am Ende der Riehe... und bewohnet diese Riehe ein Einwohner.»

31 Johan Arnhold von Brand. Reysen durch die Marck Brandenburg, Preussen, Churland, Liefland, Plesscovien, Gross Naugardien, Tveerien und Moscoviën. Wesel, 1702.

32 Bemerkungen eines Reisenden über Kurland im vorigen Jahrhundert. Geoponika. Eine ökonomische Monatsschrift für Kur- und Livlands Bewohner. II Jahrg. V St. Nov. 1799, Mitau.

33 Brand, 71. lpp.: «Dieses trucknen geschicht auch wohl zuweilen in ihren Rauchstuben über dem ofen.»

34 Kurzemes dzivojamās ēkas apraksta svarīgākā daļa ir šāda: «Sie wohnen in elenden und geringen häusserchen / worinnen mehrmahlen nur eine rauchstube / und bissweilen ein beygelegenes speicherchen ist / wo ihr liebes Brot / und schlechter tranck... samt saur kraut und jurcken / verwahret wird: in der Rauchstuben haben sie einen von dicken kieselsteinen verfertigten ofen / wie unsere backofen / welche sie mit schwarzen kohlen oder andrem holz hefftig einhitzen / nah bey welchem sie auch des nachts alle unter-einander... vermischt schlafen... diese häusserchen sind alle von dickem fichtenholz / welches sie ausswendig meistentheil etwas gleich machen / inwendig aber rund lassen / so artig zusammen geschurtzet von ihnen selbst / dass kaum der wind dadurch einbrechen kan / fügen auch unterweilen von dem most der bäumen zwischen beyden; seind oben mit stroh oder mit übergelegten flachen höltzern bedeckt / und wird das stroh mit etlichen oben auff dem dach creutzwegs über einander hinaut gestelten höltzern vor dem winde beschützel.» (69.—70. lpp.).

35 Brand, 136.—137. lpp.: Vidzemes dzivojamo ēku apraksts: «Ihre häuserchen seynd im gleichen von runden fichten höltzern zusammen gesetzt / und bestehen nur auss einer Rauch-stuben / und / wo einer etwas mehr mehr ist / aus beygefügtem speicherchen / worinnen sie ihr brod / saltz und tranck verwahren / das übrige ist nur ihrer Pferden und Kühen aufenthalt; diese rauch-stube ist mehrentheils nicht höher / als dass darinnen nur ein Mensch stehen kan / das übrige wird zur zeit des Herbstes mit ihrem auf etlichen dazu verordneten langen stangen ruhenden getreyde angefüllet / unter welchem sie den auss grossen kieselsteinen aufgerichteten / und in form unsriger bach-ofen gemachten Ofen / so weidlich einhitzen / dass man selbigen kaum von unsrigen brennenden kalkofen unterscheiden würde / ... und dieses geschicht bey ihnen / nur allein das korn zu trucknen: (wiewohl auch etliche eine besondere dazu verordnete hütte halten).»

36 Turpat, 182. lpp.: — (Pliškava)... «und wie sie mit vielen häusern bebawet... auss einer Rauchstuben und einngen speicherchen samt vielstall bestehend (aussgenommen etlicher Edelleuten / als Boyaren und Kneesen häuser / welche noch etliche zimmer mit steinernen kachel-ofen versehen) haben.»

37 Turpat, 171. lpp.

38 Turpat, 76. lpp.

39 Des Graffen von Carlile abgelegte Drey Gesandtschafften... Franckfurt und Leipzig, 1701. Tulkojums no franču val. Originals angļu valodā: Carlisle, A Relation of Three Embassies. London, 1669.

40 Dūmu istabas Krievijā (642. lpp.) nosauktas par virtuvēm (Küche), šāds apzīmējums lietots arī Vidzemes aprakstā (371. lpp.).

41 Carlile, 371. lpp.: «entweder Küchen oder zum wenigsten dazu aufgerichtete Hütten.»

42 Piemēram, Adam Olearius, Voyages très curieux et très renommez faits en Moscovie, Tartarie et Perse. Amsterdam, 1727; pirmais izdevums Schleswig, 1647. Tāpat arī J. - Straussens. Sehr schwere und wiederwertige / und denckwürdige Reysen... (J. J. Struys, Aenmerkelijke en seer ramspoedige reysen) Aus dem holl. überges. von A. M. Amsterdam, 1678. Trešais ceļojums 1668. g. okt. Ceļš no Rīgas caur Vidzemi uz Pleskavu, 66. lpp.: «Alhier giengen wir unterschiedliche kleine Dörffer fürüber / in welchen sehr arme Menschen wohnten... Ihre Häuserlein / oder / lieber Hütten / sind so schlecht / als man bedencken kan / und findet man in demselben keinen Hausrath / als etliche schmierige Döpffe und Pfannen / welche / wie das Hauss / und die Menschen selbst / so faul und unrein sind / dass ich lieber fasten / und unter dem blauen Himmel liegen wolte / als mit ihnen essen / oder schlaffen... Sie haben wenige Bette und schlaiffen auff blosser Erden. Ihre Speise ist über

die massen grob und schlecht / bestehende in Gerstenbrodt / Sauerkraut / und ungensaltzenen Gurcken / welche letze Speise den Zustand dieser armen Menschen genugsam ausbildet / lebende also allezeit in Elend und Kummer / durch die greuliche Unbarmhertzigkeit ihrer Herren / welche ärger als Türcken oder Barbaren mit ihrer Leibeigenen handeln.»

43 Rosins Lentilijs, *Curlandiae quaedam notabilia* (1677—1680). A. Tenčaja tulk. Latv. univ. raksti, Rīgā, 1924. g. Lentilijs no 1677. līdz 1680. g. dzīvo Dobeļē, tādēļ jādomā, ka viņa apraksts attiecas uz Zemgali.

44 Turpat, 20. lpp.

45 P. Einhorn, *Historia Lettica*. Dorpat, 1649. *Scriptores rerum Livonicarum*. Rīga, 1853. II, 1. 591. lpp.

46 O. Аделунг, Барон Мейерберг и путешествие его по России. СПб, 1827; Альбом Мейерберга. Виды и бытовые картины России XVII века. Изд. А. С. Суворина, 1903 г.

47 «Marienburg Schloss und Städtlein in Lieflland sehr ruiniert...»

48 M. Skujenieks, *Latvija. Zeme un iedzīvotāji*. 2. izd. Rīgā, 1922. g., 249. lpp.

49 J. Juškevičs, *Hercoga Jēkaba laikmets Kurzemē*. Rīgā, 1932. g., 194.—195. lpp.

50 Rīgas pils. mērn. arch. A. 25 ... Brandt Marquart Plätzte und Gründe nebst ein Theil denen Schlabodschen in der Vorstadt gelegen... 1695.

51 Rīgas mērn. arch. A. 19. Abriss über den Lepingschen Gründen zu Strugsragge. 1693.

52 Turpat, A. 20. Kiepenholm sonsten auff Lettisch vor alters Schagger-sall genant nebst Thärholm. 1694.

53 Rīgas mērn. arch. A. 13. St. Georgen Hoffs Landt und Gründe über der Dūna. 1690.

54 Br. VII-2.

55 Rīgas mērn. arch. A. 8. Charte der Land-Vogtey und «Übersetzer» Länder. 1688.

56 No izdevuma: A. Stāls, J. K. Broce. Rīgā, 1926. g.

57 O. Гун, Топографическое описание города Риги, СПб, 1803 г. 45. lpp.

58 Citēts no J. Strauberga, *Vecā Rīga*. Rīgā, 1951. g., 81. lpp.

59 H. Mehlbart, *Der Wohnbau. Riga und seine Bauten*. Rīga, 1903, 345. lpp.

60 Piemēram, O. Stiehl, *Der Wohnbau des Mittelalters*. H. d. A. II, 4.2. 138. lpp.; O. Völckers, *Deutsche Hausfibel*. Leipzig, 1937, 70.—77. lpp.

61 J. Straubergs, *Vecā Rīga*, 89. lpp.

62 N. Mollina vara grebuma attēli ņemti no LPSR MP Architektūras pārvaldes Pieminekļu aizsardzības daļas materiāliem (arch. A. Vecsīļa fotozņēmumi).

63 Pazīstamākie attēli sakopoti izdevumā: *Senā Rīga gleznās, zīmējumos un gravīrās*. Rīgā, 1937. g. No šiem attēliem nomaļu apbūve rādīta 1640. gada Rīgas plānā, kas publicēts arī *Olearija izdevumos*; sevišķi sīki attēlotas Rīgas priekšpilsētas 1690.—1700. g. zīmējumā, kas glabājas *Stokholmas kara arhīvā* (fotoattēls Rīgas vēstures (Doma) muzejā).

64 Ch. Bornmann, *Mitau. Ein historisches Gedicht aus dem siebzehnten Jahrhundert*. Erste Ausg. Mitau, 1686. Neu Ausg. Mitau, 1802, 27. lpp.:

«Wenig Häuser sind von
Stein, meistentheils von Holz gebauet.
... Stube, Kammer, Küche, Keller
Kleete, Boden, Hoff und Stall...
stehn in Ordnung überall.»

⁶⁵ Scheinbarliche Designation der Fürstlichen Residentz-Stadt Mihtav. Landmesser Tobias Krause, 1652.

Originals Valsts Vēstures muzejā. Grafiskas kopijas reprodukcija J. Juškeviča darbā Hercoga Jēkaba laikmets Kurzemē, Rīgā, 1932. g., 554. lpp.

⁶⁶ Vara grebuma kopojuums bez nosaukuma Valsts bibliotēkas retumu nodaļā. Daļa attēlu atbilst Vinkelmaņa (Winkelmann), 5921. num. atzīmētajam kopojuumam.

⁶⁷ Originalā uz vienas lapas Jelgava, Bauska un Liepāja. Pievienotais attēls rāda tikai Jelgavas centrālo daļu.

МАЛЫЕ ДОМА ЛАТВИИ В XVII ВЕКЕ

Малые дома Латвии строятся и заселяются трудовым населением городов и сельских населенных мест. В период позднего феодализма и капитализма своей планировкой и решением объемов они сильно отличаются как от барских домов в сельских местностях, так и от доходных домов и богатых особняков в городах.

Древнейшим периодам, от которого сохранились описания или изображения малых домов Латвии, является XVII век. По сельским домам наиболее ценные материалы имеются в инвентарных описях имений. Дома XVII в. в Латвии вообще отличаются своими небольшими размерами и простыми решениями плана и объема. Даже барские дома в это время имеют много общих черт с малыми домами помещичьих служащих и сельских ремесленников. Обычные барские дома XVII в. как в Видземе, так и в Курземе и Земгале строятся по одной планировочной схеме. Они имеют в центре дома массивную отопительную камеру — кухню, по обеим сторонам от которой расположены отапливаемые комнаты, а за ними следуют неотапливаемые коморы. Размеры помещений и число комор в главном барском доме и в домах фольварков несколько отличаются, но основная схема построения плана и объема сохраняется.

Для истории малого дома XVII в. весьма ценны данные о домах помещичьих служащих. Это обычно деревянные рубленые здания с соломенными крышами. В средней части они имеют отопительную камеру — кухню и рядом с нею 2 комнаты с коморами. В комнатах и коморах устроены застекленные окна, потолки этих помещений дощатые, но полы часто глинобитные.

Некоторые интересные детали планировки и конструкций небольших деревянных зданий имеются в описаниях корчмы XVII в. Там в одном здании объединены следующие помеще-

ния: конюшня, комната и 1—2 коморы. Открытый очаг с деревянным, обмазанным глиною колпаком устроен в конюшне, от туда отапливается кафельная или сложенная из кирпича печь комнаты.

Дом мельника в Видземе состоит из кухни-передней с открытым очагом, из комнаты и коморы. Стены дома рубленые, кровля соломенная или из щепы. Комната обычно имеет глинобитный пол, дощатый потолок и небольшие застекленные окна.

В инвентарных описях имений в Видземе имеются примеры еще более простых домов сельских ремесленников. Такой рубленый, крытый соломой или щепой дом обычно состоит из двух помещений — из курной комнаты и коморы, а иногда является и однокамерной курной избой. Вместо застекленных окон в таких домах имеются волоковые окна, пол глинобитный, а потолок устроен из жердей. С инвентарных описях такие дома называются ригами, наравне с сельскими зданиями, в которых сушится скошенный хлеб.

В инвентарных описях имений нет данных относительно крестьянских домов. Для характеристики последних приходится пользоваться описаниями путешественников и некоторыми литературными источниками XVII в. Однако сведения соответствующих авторов — И. Бранда, графа Карнила, А. Олеария, И. Струиса (И. Страусена), Р. Лентилия, П. Эйнгорна, весьма скудны и противоречивы. Особенно это следует отметить по поводу этнографического очерка И. Бранда. Мало точных сведений можно почерпнуть и из живописных рисунков И. Шторна, сопровождавшего барона Мейерберга в его путешествии.

Критическое изучение всех материалов приводит к выводам, что в XVII в. крестьянское жилище в Видземе состояло из курной избы и отдельного здания кухни, сложенного из жердей в виде шалаша. В литературных источниках такая курная изба имеет одинаковое обозначение со зданиями для сушки скошенных хлебов, и не исключено, что крестьяне в Видземе в XVII в. частично жили в ригах. Жилище сельского ремесленника состояло или из курной комнаты и коморы, или из кухни-передней, комнаты, отапливаемой из передней, и неотапливаемой коморы.

Крестьянское жилище в Курземе и Земгале в XVII в. было более благоустроено. Хотя в отдельных имениях и там не исключено наличие курной избы, в лучших примерах крестьянский дом в Курземе и Земгале в это время был однопролетным рубленным зданием с соломенной кровлей, и в нем были устроены три помещения: кухня-передняя, комната и кладовая. В

кухне был устроен открытый очаг, комната отапливалась со стороны кухни и имела небольшие застекленные окна.

О крестьянском доме в Латгале в XVII в. не удалось собрать достоверных данных.

По жилой застройке Риги в XVII веке весьма ценным источником является гравюра Н. Моллина от 1612 г. На этой гравюре в аксонометрическом виде показана, как укрепленная часть города, так и его окрестности. Центральная часть Риги внутри крепостных стен застроена в основном небольшими двухэтажными домами, выходящими торцами на улицу. Подобные же одноэтажные дома имеются на окраинах Риги. План Т. Краузе от 1652 г. показывает, что такие же типы одноэтажных домов в это время доминировали и в застройке Елгавы. В части дома, выходящей на улицу, находились мастерские или торговые помещения. Жилая комната располагалась в одноэтажных домах в глубине дома, в двухэтажных домах — на втором этаже; мансарды дома использовались под склады.

Геодезические планы Риги с аксонометрическими изображениями застройки окраин показывают, что в конце XVII в. на окраинах Риги появляется новый тип малого дома. Это однопролетный, двухраздельный рубленый дом с боковым входом. В доме устроена кухня-передняя и комната, отапливаемая со стороны кухни. Дом не имеет дымовой трубы, но в комнате устроены застекленные окна. Этот тип малого дома получает широкое распространение в городах Латвии в течение XVIII в.

A. BIRZENIEKS, *architektūras kandidāts.*

RĪGAS BAROKA UN KLASICISMA LAIKMETA PILSOŅU NAMU FASADES KOMPOZĪCIJAS PAŅĒMIENI.

Jau sen pirms tā, kad vēsturē tiek Rīgas vārds minēts, Daugavas lejtecē pie Rīdziņas ietekas pastāvēja lībiešu tirdzniecības apmetne ar ostu. Šo ģeopolitiski izdevīgo vietu bīskaps Alberts izvēlējās par bazi turpmākiem iekarojumiem. Tas notika 1201. gadā.

XIII un turpmākajos gadsimtos tiek celtas senās Rīgas sakrālās celtnes, kas vēl šodien veido pilsētas īpatnējo siluetu. Viduslaiku profanās celtniecības liecinieki līdz mūsu dienām nav uzglabājušies. Par tiem laikiem runā vienīgi Vecrīgas sarežģītais ielu tīkls un dziļie, šaurie apbūves gabali.

Profesora Jāņa Strauberga Vecās Rīgas situācijas plāns¹, kas ir ilggadīga un rūpīga pētījuma rezultāts, sniedz labu pārskatu par pilsētas iedalījumu XV un XVI gadsimta mijā (1. attēls). Toreiz ieliņas ir šauras, gruntsgabali dziļi. Dzīvojamās ēkas galeniski vērstas pret ielu. Zelminis stāv blakus zelminim.

Tas ir viduslaiku pilsētas raksturīgais apbūves veids.

Mūsu kaņiņrepublikas galvas pilsētā Tallinā veselas ielas rāda šādu ēku novietnes paņēmieni. Tallinas vecais tirgus laukums «Vanaturg» ir tādā veidā ietverts. Līdzīga ēku novietne dažkārt sastopama arī Rīgā. Mināmi kaut vai īpatnēji ansambļi Mazajā un Lielajā Pils ielā, Miesnieku ielā, tāpat Vecpilsētas noliktavu rajonā.

Salīdzinot Rīgas pilsētas plānu no 1500. gada ar mūsdienu Vec-Rīgas plānu izrādās, ka gruntsgabalu lielums un apveids par pēdējiem 4¹/₂ simts gadiem, visumā, tik pat kā nav mainījies.

Gain viens otrs kvartāls ir pilnīgi izzudis un pasaules kara gaitā ir iznīcināta diezgan prāva Vecās Rīgas daļa. Tomēr vairums palikušo ēku atrodas uz gruntsgabaliem, kuru robežas sakrīt ar Strauberga Vec-Rīgas plānā rādītām robežām no 1500. gada. Ja jau apbūves gabaliem piemīt tik konservatīvs raksturs, ka tie nemainīgi saglabājušies līdz mūsu dienām, tad jo vairāk

¹ J. Straubergs «Vecā Rīga» — Latvijas valsts izdevniecība 1951. g.

varam secināt, ka tie XVII g. s. būs bijuši analogi 1500. g. grunts-
gabaliem.

Tāisni XVII g. s. mūs interesē, jo tas ir gadsimtenis kad Rīgas arhitektūrā ieviešas baroks.

Itālijā baroks ka gatava stila faze izveidojās XVI g. s. beigās. Velflins kā aptuvenu datu min 1580. gadu¹. Ap šo laiku tika sarau-
tas saites ar priekšnoteikumiem, kas izriet no nosvērtās renesan-
ses kulturas un prasības pēc harmonijas un likumības arhitek-
turā, kuras savā laikā bija izteicis Leons Battista Alberti.

Tagad atveras durvis individualismam un patvaļai. Tādā iz-
pausmē baroks izplatās Vakareiropas katoliskajās zemēs, kurās
baznīca centās nostiprināt reformācijas kustībā zaudēto prestižu.
Blakus brīvajam novirzienam pastāv baroks, saistīts ar akadē-
miskām tradīcijām. To kultivēja ievērojamais celtnieks un archi-
tekturas teoretīķis Andrea Palladio (1508—1580). Viņa publika-
cijas it sevišķi «Četras grāmatas par arhitekturu» (1570. g.)
sekmēja viņa ideju izplatīšanos pa visu Eiropu.

Palladio mērenais, mazliet pasausais baroks sastapa jūsmīgu
piekrišanu tajās protestaniskajās valstīs, kurās bija izaugusi bur-
žuaziski nacionāla kultūra, kā piemēram Holandē un Anglijā.

Rīgai ar Holandi XVI un XII g. s. bija visciešākie saimnieciskie un kulturalie sakari. Parādījās Holandes baroka istablietas. Pilsoņu namos telpu sienas labprāt klāja ar zilbaltām Delftas plātnītēm. Parādījās holandiešu valodā iespiestas grāmatas, to starpā darbi par celtniecību. Holandes kuģi ir bieži redzēti viesi Rīgas ostā.

Tā ar Holandes starpniecību līdz tālajai Rīgai nonāk Itālijas
Palladio novirziena baroks ar vairāk kā simts gadu novēlošanos.

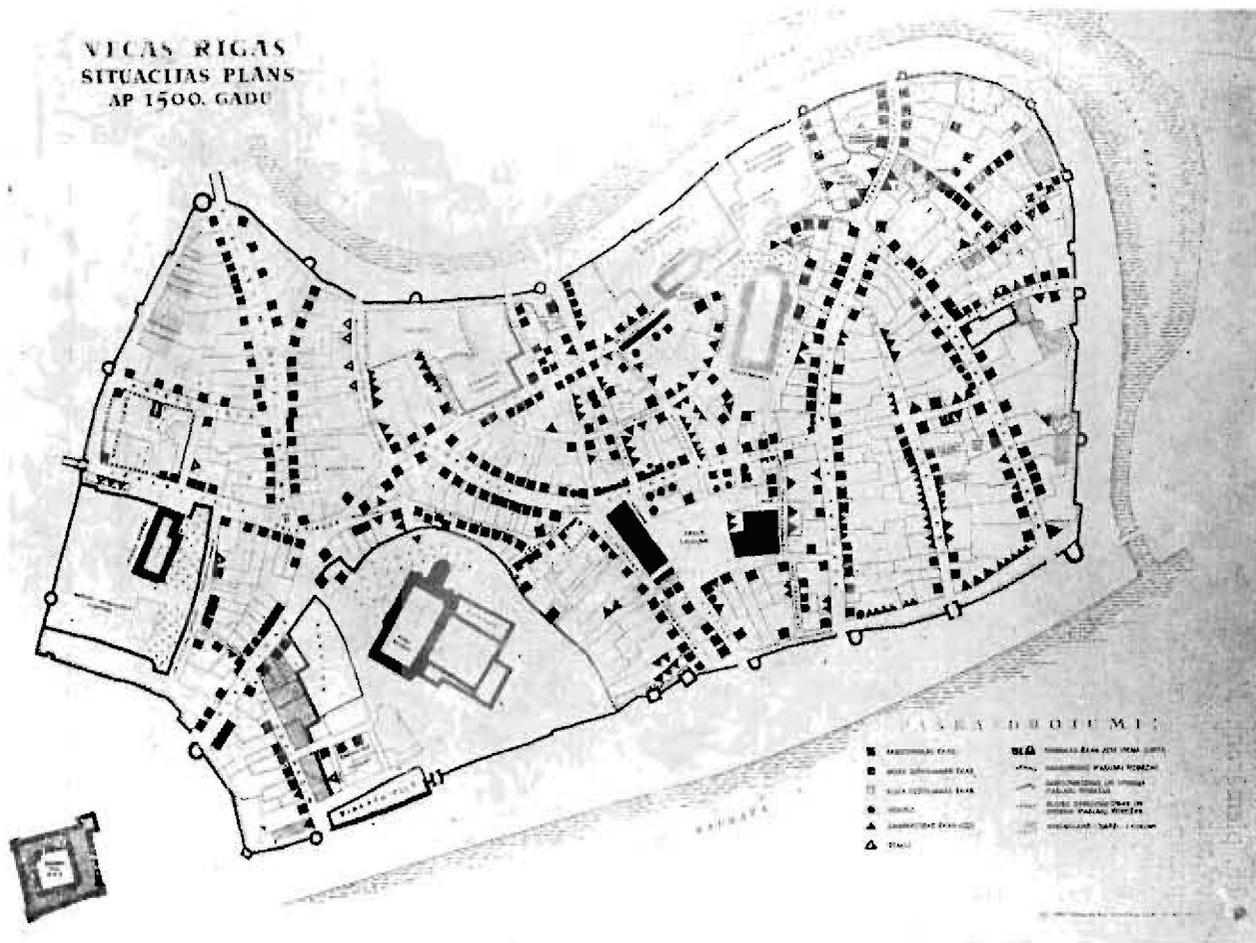
Pateicoties izvērstajai tirdzniecībai ar rietumiem un austrumiem pilsētas iedzīvotāju turība auga. Auga arī pilsētas iedzīvotāju skaits. Uz Rīgu plūda daudz zemnieku, kas šeit meklēja un atrada patvērumu no dzimtkungu patvaļas. XVII g. s. Rīga ar saviem 10—15000 iedzīvotājiem bija viena no lielākajām Baltijas jūras ostām. Zviedrijas galvas pilsētā Stokholmā XVII g. s. sākumā bija tikai 9000 iedzīvotāju¹.

Mūriem apjoztajā pilsētas teritorijā vajadzēja izmantot katru kvadrātpeđu. Kārņiņiem iesegtas augstās bēniņu telpas varēja viegli izgaismot, ielaužot zeltiņos attiecīgas logailas. Aiz zeltiņa sienas atradās vēl divi stāvi, derīgi apdzīvošanai. Ēkas, kas bija celtas iepriekšējos gadsimteņos nācās modernizēt. Tas ir — vecie gotiskie ar smailloku līdzenām daļlotie zeltiņi tika pārveidoti XVII g. s. gaumē — t. i. — barokizēti.

¹ Heinrich Wölfflin: Eine Untersuchung über Wesen und Entstehung des Barockstils in Italien.

² Latvijas PSR vēsture I s. 1. p. 185.

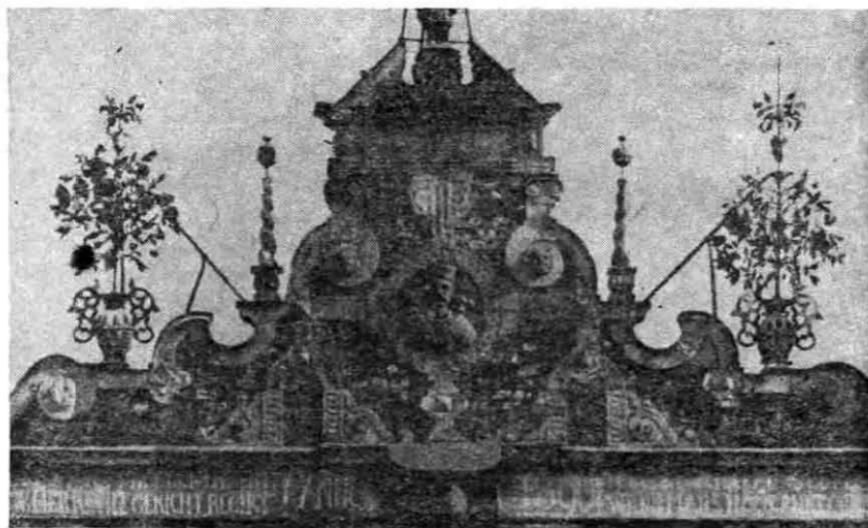
VĒCĀS RĪGAS
SITUĀCIJAS PLĀNS
AP 1500. GADU



1. attēls. Vecās Rīgas situācijas plāns ap 1500. gadu (J. Straubergs «Vecā Rīga» 1951. g.).

Jaunā mode skar kā sabiedriskās celtnes, tā dzīvojamās ēkas. Tā, piemēram, Melngalvju nama fasade pirms XVII g. s. izdaiļošanas ir bijusi veidota kā t. s. «kāpņu zelminis» divās, trīs pakāpēs. Apmēram tādu Melngalvju nama ārējo veidu rāda vecākie Rīgas grafiskie attēli, piemēram, Mollina 1612. g. vara grebums.

Ap 1620. gadu augšējo pakāpi noņēma un tās vietā zelmini izdaiļoja ar jaunu noslēgumu, kuru vaināgo lauzts baroka frontons (2. attēls). Tāpat nolīdzināja pārējos kāpšļus un dekorēja ar motīviem, raksturīgiem Ziemeļeiropas barokam. Zelmiņa apveidu ietvēra smilšakmens apmale, kas gleznaini kontrastēja ar ēkas sarkano ķieģeļu sienām. Šāds fasades izdaiļošanas veids bija sevišķi iemīļots Holandē, kā arī visur tur, kur holandiešu meistari strādāja. Piemēram, Anglijā, kur t. s. jaunā muižniecība, kas radās pēc angļu buržuaziskās revolūcijas līdzīgā gaumē cēla sev lauku pilis. Šī holandiešu baroka interpretācija dažkārt tiek lietota Rīgas dzīvojamo ēku zelmiņus izveidojot, protams, ne tik bagātā apdarē kā pie Melngalvju nama.



2. attēls. Rīgas Melngalvju nama zelminis (autora Vecās Rīgas foto arhīvs).

Kad uz plašākiem gruntsgabaliem cēla jaunas ēkas, tad tika mainīts galvenās ass virziens, tas gāja līdztekus ielai. Tāds jauninājums pilsētas apbūves veidā notika XVII g. s. beigās — vēlinā feodalisma posmā. Tagad ražošanas spēkiem attīstoties jau veidojās priekšnoteikumi nākošai progresīvākai ekonomiskai formācijai — kapitalismam. To iezvanīja Rīgas buržuazija, kas kāra uz visu jauno, tapa par baroka izveidotāju.

Rīgā šai laikā darbojās 20 latviešu amatu jeb cunftes, viņu skaitā — mūrnieku, namdaru un kalēju. Šie amati, kas nodarbojās ar jaunu namu celšanu, vai esošo namu pārbūvi, atradās latviešu rokās.¹

Jo vairāk baroks attālinājās no savas dzimtenes Itālijas, jo vairāk tas zaudē savu specifiku: dinamiku un plastiskumu. Šāda mērena baroka ziemeļnieciska interpretācija ir raksturīga Rīgas XVII un XVIII g. s. pirmās puses arhitektūrai.

Lietotie dekoratīvie elementi ir ļoti atturīgi. Šaurās pret ielu vērstās namu fasades kompozīciju nosaka zelmaņa apveids un portals. Nāk vēl klāt lielle, sīkās rūtīs sadalītie logi.



3. attēls. Jēkaba baznīcas apkārtnē (Mag. Broces zīmējums no 1785. g.).

¹ Latvijas PSR vēsture — Latvijas PSR Zinātņu Akadēmijas izdev. 1953. g.

Tādi holandiešu veida zeltiņi Vecrīgā vairs nav uzglabājušies. Pareizāki sakot, tie uzglabājušies tikai daļēji. Pietiekami skaidri tādas ēkas pretskatu var saskatīt Broces 1785. g. zīmējumā, kas rāda Jēkaba baznīcas apkārtni līdz ar mazās Pils ielas raksturīgo celtņu ansambli¹ (3. attēls).

Latvijas PSR Ministru Padomes Valsts Celtniecības un arhitektūras komitejas zinātniskās restaurēšanas darbnīcas kolektīvs arhitekta P. Sauliņa vadībā ir divus no šiem namiem atjaunojis². Šis darbs ir nopietna zinātniskā meklējuma rezultāts.

Namu m. Pils ielā 19 var uzskatīt par tipisku XVII g. s. pirmās puses Rīgas pilsoņu mitekli. Tas ir atturīgs, izteiksmīgs un lietderīgs. Arhitektūras izteiksmes līdzekļi ir skopi (4. attēls).

Horizontāla josla atdala zeltiņi no ēkas apakšējiem stāviem. Gludās sienas atdzīvina logailas un galvenais dekoratīvais akcents ir portāls. Portāls nav saistīts ar fasādi, kā tas ir raksturīgs visā Rīgas baroka laikmetā, bet iedarbojas kā patstāvīgs dekoratīvs elements.

Tāda kompozicionāla atrautība starp portāla un ēkas fasades veidojumu liek domāt, ka paradums daiļot pilsoņu namu ieejas ar grezniem portāliem ir ieviesies dziēgan vēlu — tikai ar XVI g. s. beigām vai XVII g. s. sākumu. Portālus iebūvēja pastāvošos namos, kuri dažkārt bija celti jau viduslaikos.

Blakus šādam holandiešu gaumē veidotam zeltiņim Rīgā bija vēl pazīstams otrs zeltiņa kompozīcijas veids. Zeltiņa konturu noteica viena virs otras novietotas volutas, dekorētas ar augu motīviem (5. un 6. att.). Abos kompozīcijas veidos zeltiņa noslēgums ir vienāds, t. i., neliels pusloka vai trīsstūra veida frontons.

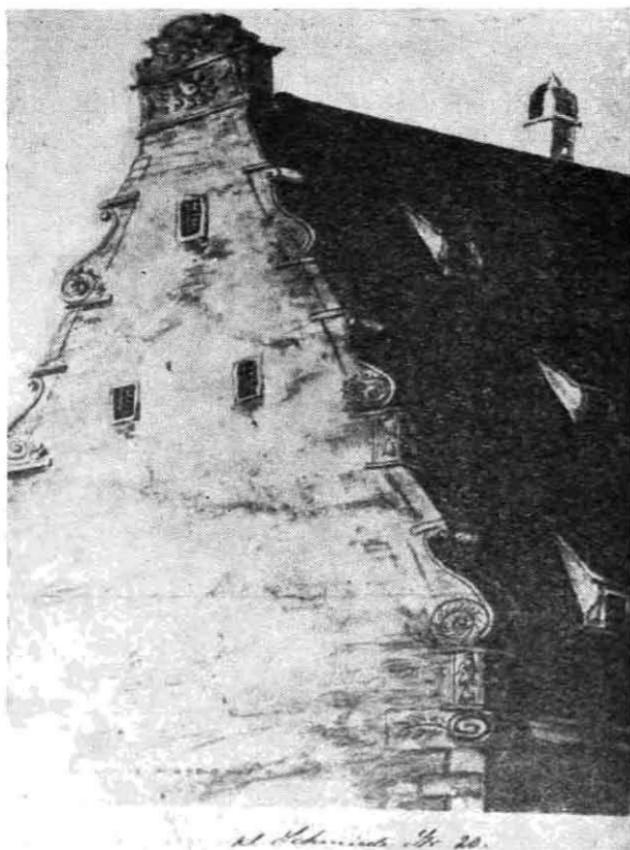
Īpatnējākais varbūt ir tas, ka šīs baroka ēku fasades ir komponētas tikai divās dimensijās. Visi profili ir tikai minimāli izvirzīti no sienas virsmas. Logrāmji nav slēpti aiz piedurām, bet sakrīt ar sienas plakni. Rūsti kas dažkārt sastopami, nav visplastiski veidojumi, bet tikai uzgleznoti. Tāpa portāla plastika ir reducēta līdz minimumam.

Bagāto pilsoņu namos, kas celti XVII g. s. beigās, parādās jauns fasades kompozīcijas veids. To galvenokārt nosaka ēkas novietne pret ielu. Fasades sienas garums dominē par tās augstumu. Augšup traucošās šaurās fasades vietā, kurā vēl slēpjas gotikas vertikālisms, parādās garenā virziena fasade.

Galeniski pret ielu novietotā fasadē atradās katrā stāvā tikai divas, augstākais trīs logailas. Jaunā novietne atļauj komponēt fasādi ar piecām, pat septiņām logailu asīm. Logailu propor-

¹ Broce J. K. — Sammlung verschiedener Liefländischer Monumente, Prospekte u. t.

² M. Pils ielā 17 un 19.

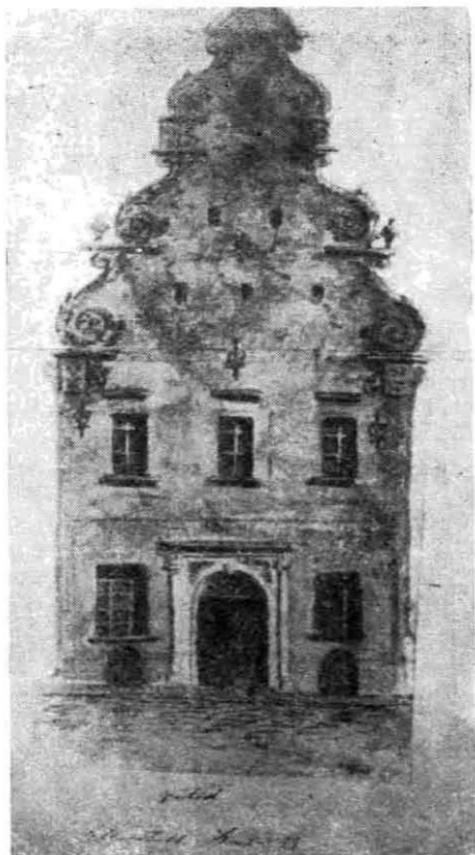


5. attēls. Vecās Rīgas pilsoņu namu zeltiņu veidi
(Bokslafa Vec-Rīgas zīmējumu krājums).

cijas kļūst stieptākas. Fasades sienas virsma tiek uzirdināta ar pilastriem. Tā saucamais Palladio «lielais kārtojums» sadala fasadi sākot no ielas līmeņa līdz pat antablementam.

Tās ir kopīgās iezīmes, kas raksturo 1685. g. celto rātskunga Reitera un 1696. g. celto lieltirgotāja Danenšterna namus. Abiem namiem ir divi stāvi ar mezonīnu un augsts kārniņu jumts.

Reitera nams izrotāts ar ļoti spēcīgu dekoratīvu plastiku un kā vienīgais Rīgas pilsoņu nams lepojās ar kolonām daiļotu portalu (7. att.). Te portals atrodas ēkas vidū. Danenšterna nama divi portali tiek akcentēti ar frontoniem. Abiem namiem arhitektoniskie locekļi veidoti ar ļoti necīgu reljefu. Tas sakāms par pilastriem, tas arī attiecināms uz dzegām un pārējiem ēkas profiliem (8. att.).



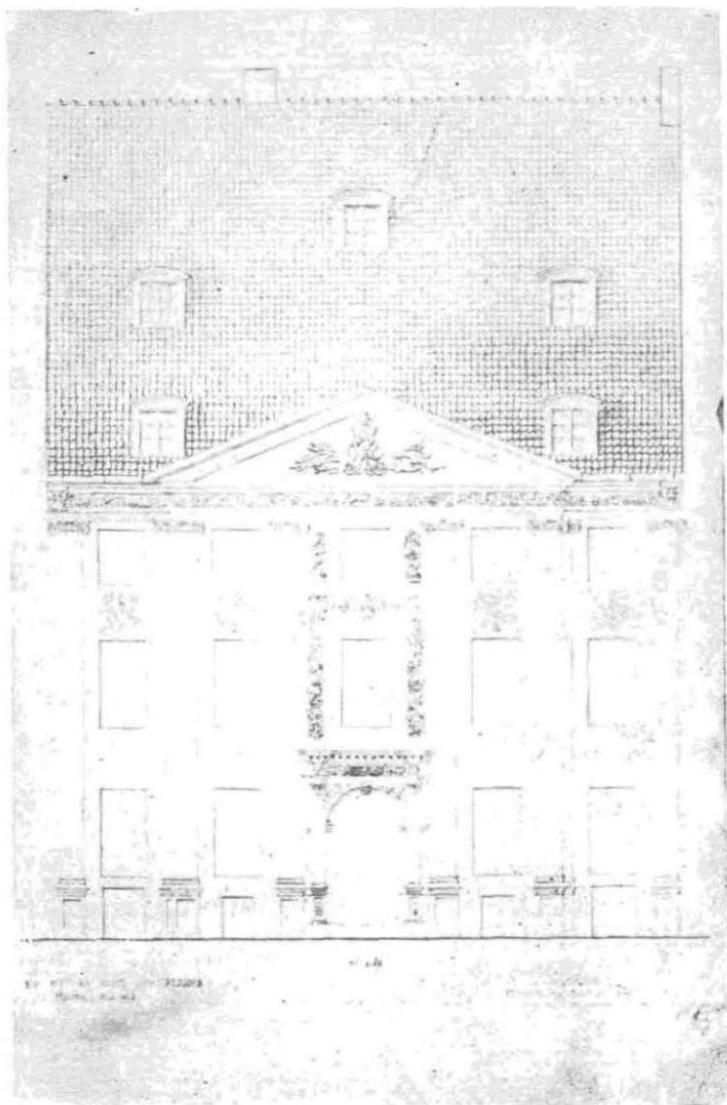
6. attēls Vecās Rīgas pilsoņu namu zelmiņu veidi
(Bokslāfa Vec-Rīgas zīmējumu krājums).

Klasicisma ieviešanās Rīgā saistās ar pilsētas būvmeistara Kristofa Haberlanda vārdu (1749.—1803.) Rīgā kopš 1778. gada.

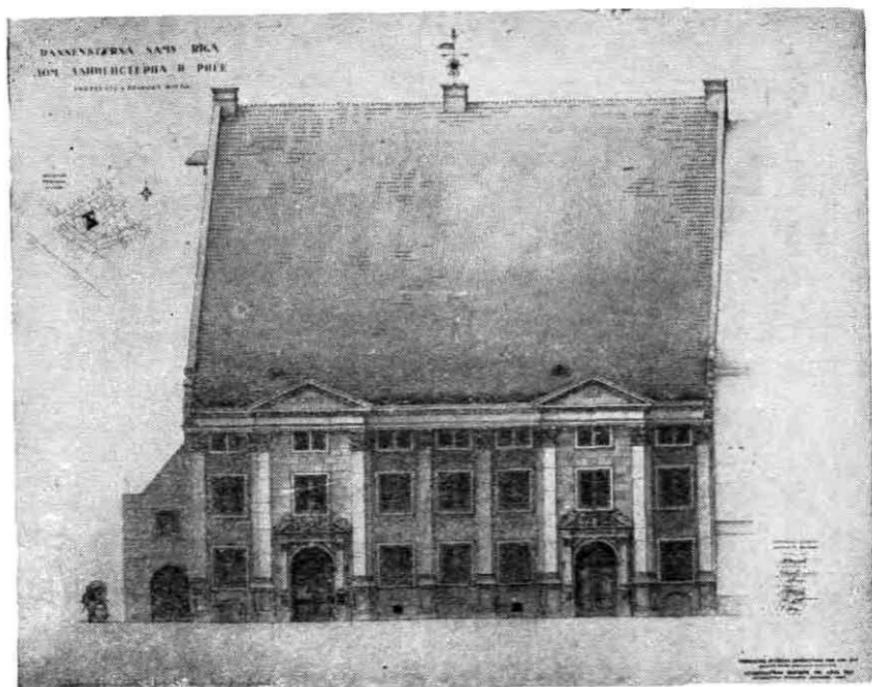
Haberlands ir slavenā Krievijas architekta Vasilija Ivanoviča Baženova laikabiedrs (1737.—1799.). Baženovs architekturu studē Parīzē, ir galma architekta Charles de Valy māceklis. Stiprāku ietekmi uz viņu būs gan atstājuši Gabriels un Sufflo un citi tā laika franču architekta meistarī.

Haberlands mācās Drezdenē un Berlinē, kur tas pats t. s. aristokratiskais klasicisms bija ieviesies. Tālab nav grūti abu meistarū darbos saskatīt zināmu radniecību.

Tiesa gan, Baženovs strādā pie spožā Katrīnas galma, strādā pie lieliem sabiedriskā rakstura uzdevumiem. Haberlanda uzde-



7. attēls. Reiterna nama, Mārstaļu ielā Nr. 2, fasades uzmērojums (LVU arhitektūras nodaļas arhīvs).



8. attēls. Danenšterna nama, Mārstaļu ielā Nr. 21, fasades uzmērojums (LVU arhitektūras nodaļas arhīvs).

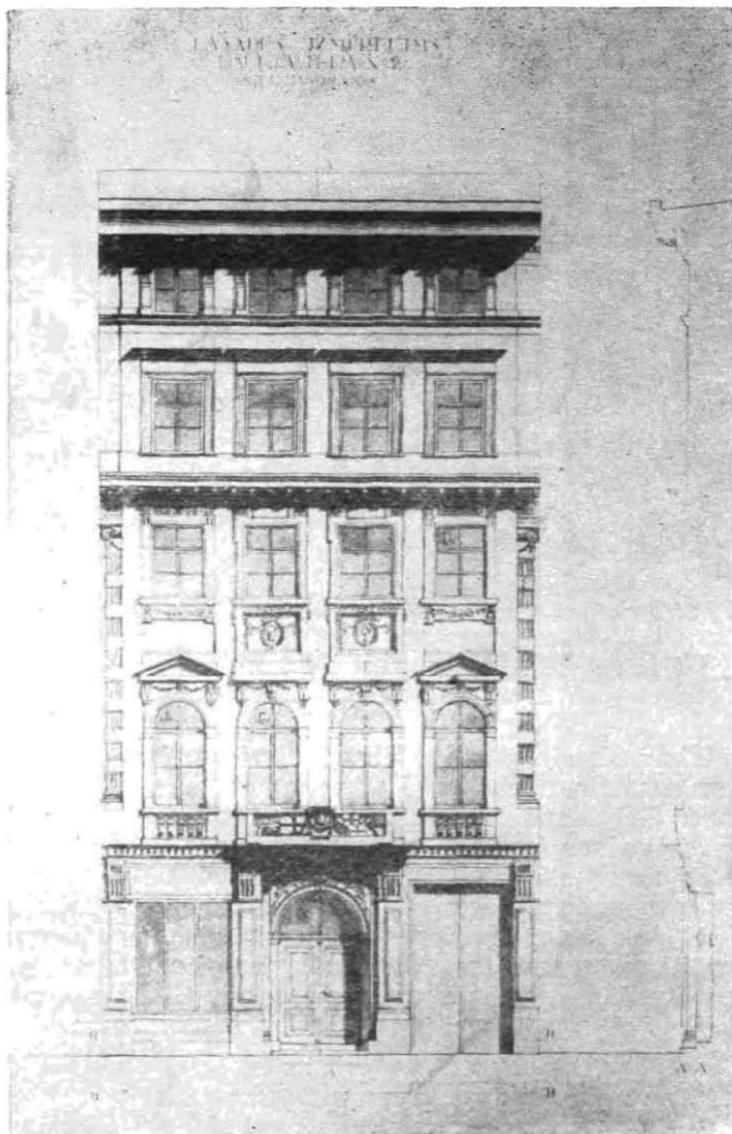
vuma loks ir daudz šaurāks. Rīga ir tikai province un pasūtītāji ir Rīgas maģistrats un turīgā pilsonība.

Toties Haberlandam izdevās Rīgā pavadītajos divdesmit gados realizēt visus iecerētos nodomus, bet par Baženova grandioziem plāniem runā vienīgi zīmējumi un maketi.

Rīgas pilsoņiem Haberlands ceļ daudzstāvu dzīvojamos namus. Šīs ēkas ir daudzkārt pārbūvētas un sākotnes plānu risinājumi grūti rekonstruējami. Var runāt vienīgi par telpu vispārējo dispozīciju. Tā visiem pilsoņu namiem bija daudz maz vienāda. Pirmajā stāvā atradās veikala telpas ar kantori un noliktavām. Otrā stāvā novietojās dzīvojamās telpas, bet trešajā stāvā un mezoninā atradās guļamistabas.

Tāpat vairums viņa celto ēku ir ar 3½ stāviem. Nāk vēl klāt dažkārt izbūvētais mansarda stāvs. Fasades risinājumi nekad neatkārtojas, bet kompozicionālā schemā saskatāmas kopīgas iezīmes un radniecīga uzbūve.

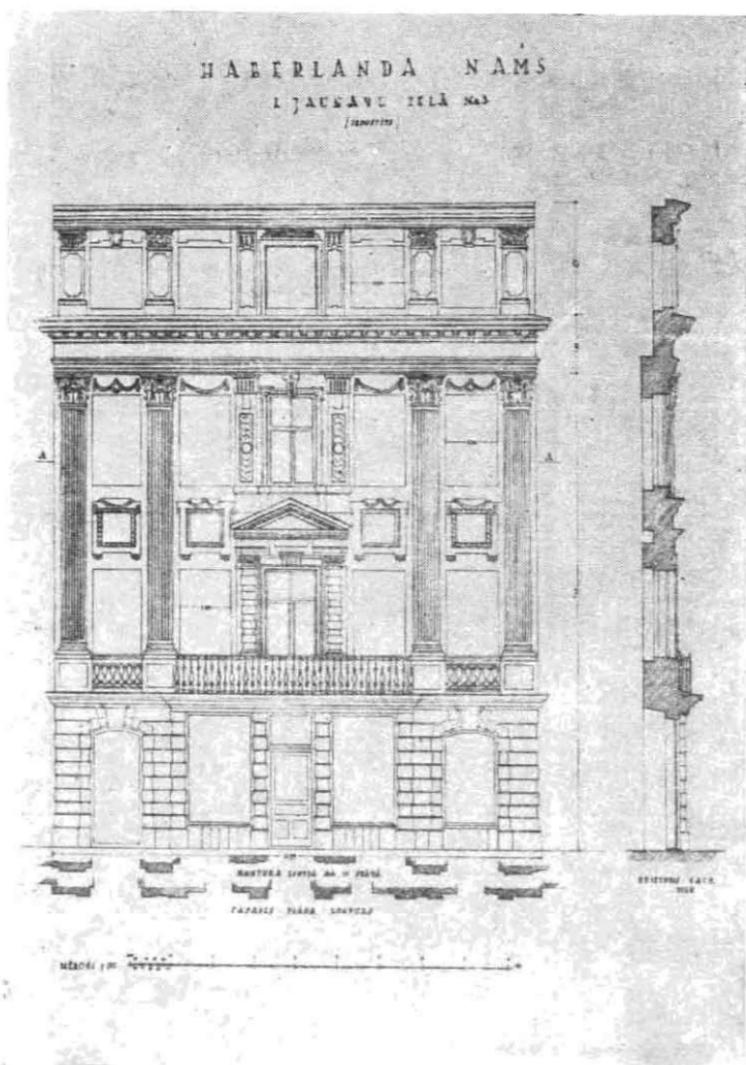
Plauktveidīga plakana josla atdala parasti rusticēto zokelstāvu no galveniem, t. i., no otrā un trešā stāva. Ēkas siena sadalīta



9. attēls. Nams Kalēju ielā Nr. 2, ko Haberlands pats sev bija būvējis.



10. attēls. Nams Smilšu ielā Nr. 5 (attēli 9. un 10. no LVU arch. nod. archiva).

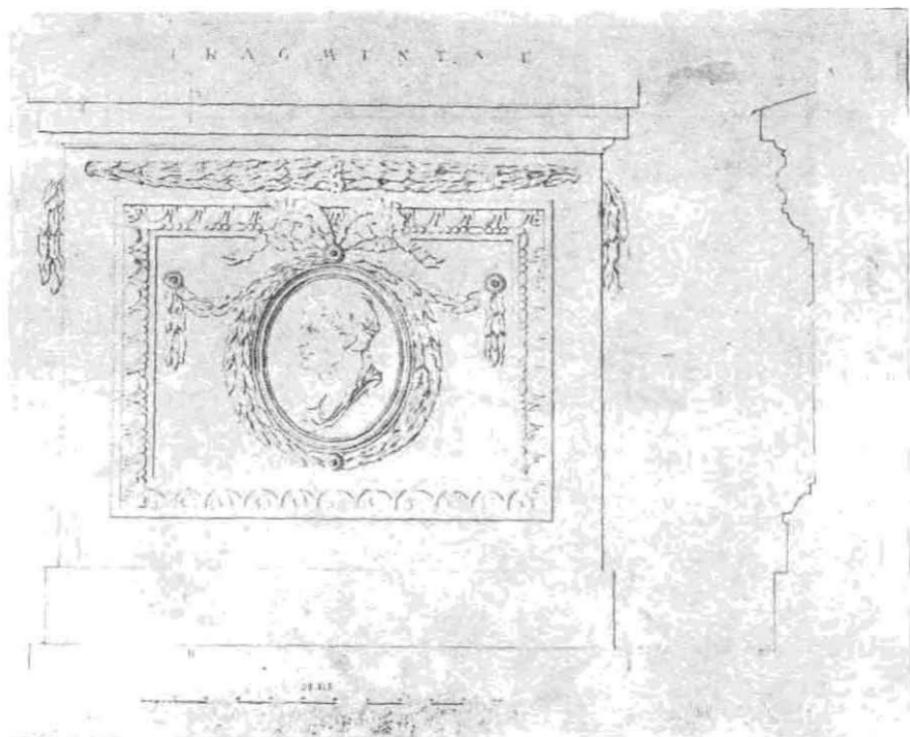


11. attēls, Nams L. Jaunavu ielā Nr. 3 (no LVU arhitektūras nodaļas archīva).

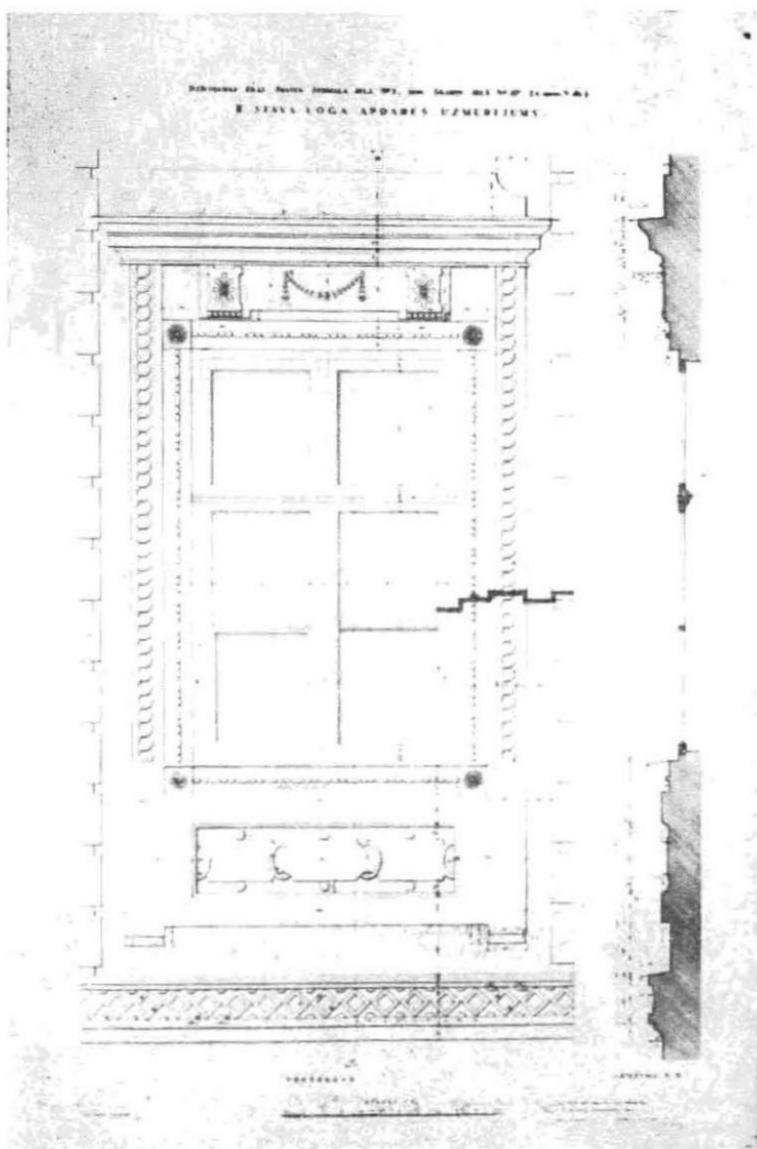
vertikālos laukumos, uzsverot centru, dažkārt izceļ vēl fasādes sienas nobeigumus ar pilastriem vai rustiem. Fasādes sienas otrā un trešā stāva vertikālismu pasvītīro stieptās logailu formas. Ar to pašu nolūku vidējo stāvu logus vaināgo frontoni (saudriki) un zem tiem parādās ornamentāls dekors (9. un 10. att.).

Haberlands dažkārt lieto «lielo kārtojumu» ar joniska vai korintiska ordera pilastriem, retāki rusticētas lizenas (11. att.).

Visumā ornamenta lietošanā novērojama liela atturība. To izmanto vienīgi kā līdzekli ar kura palīdzību saista atsevišķos stāvus. Ornamenta asortiments ir patapināts no Lui XVI stila krājumā. Te sastop vītnes, medaljonus ar un bez ģimētnēm, cilņveidīgas plātnes, pērļu virknes, meandrus, triglifus utt. Bet visi šie ornamentī ir pārkausēti, individualizēti un meistars tiem ir pratis uzspiest intīmu, gribētos teikt — pilsonisku raksturu (12. un 13. att.).



12. attēls. Dekorācijas fragments no Haberlanda nama Kalēju ielā Nr. 2 (LVU arhitektūras nodaļas arhīvs).



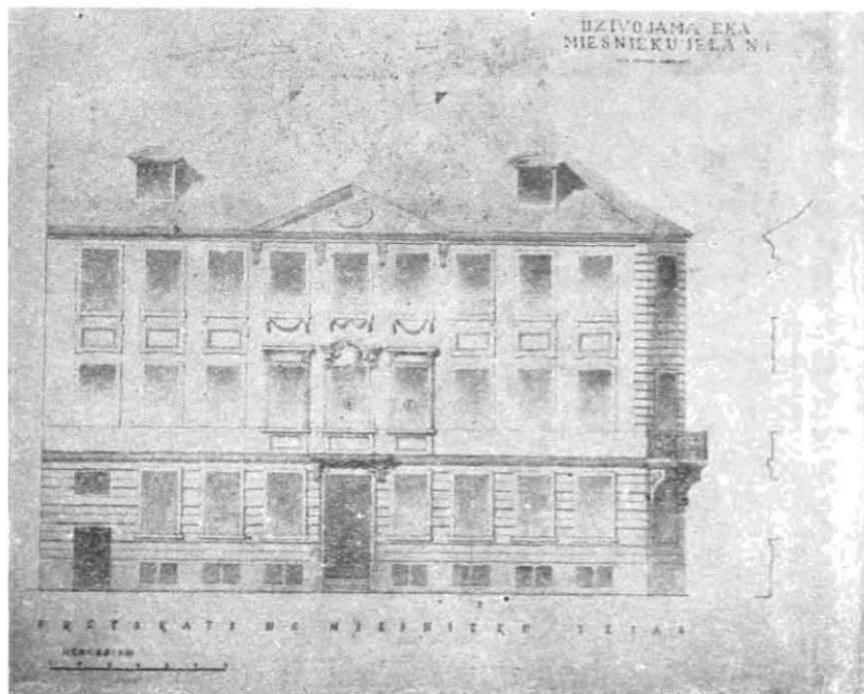
13. attēls. Loga apdare. Imanta Sudmaļa ielā Nr. 1 (LPSR Ministru Padomes Valsts celtniecības un arhitektūras komitejas pieminēto aizsardzības arhīvs).

Haberlands lietoja divējādus stūra risinājumus. Ēkas stūris tiek nošļauts 45° leņķī un otrais stāvs izcelts ar balkonu (14. attēls).

Otrs kompozīcijas paņēmieni mīkstina ēkas stūra šķautni, ietilpinot viņā trisceturtdaļ kolonu. Tā sākas uz zokoļa stāvu noslēdzošās horizontalās joslas, sniedzas cauri diviem stāviem un izbeidzas zem ēkas vaiņagojošās dzegas (15. att.).

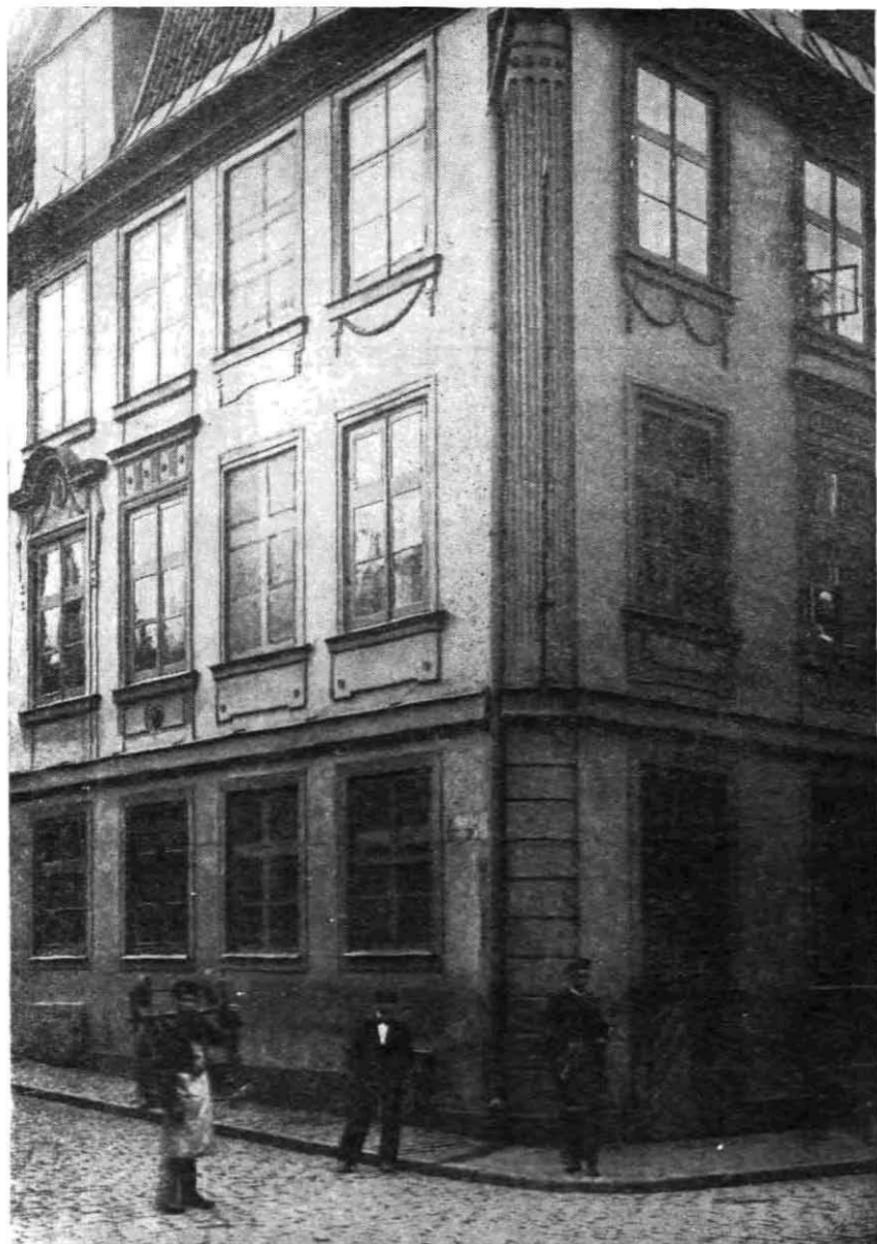
Kolona var būt ar vai bez vadziņām, viņa ir bez entazes un tai dažkārt trūkst bāzes vai kapitēļa. Bagātākā izveidojumā Haberlands lieto Filibera Delorma¹ t. s. «franču ordera» paņēmieni. Tad kolonas stāvs tiek ritmiski sadalīts ar starplikām. Tās ir gludas, jeb rozetēm dekorētas. Dažkārt Haberlands līdzīgā veidā darina fasādi noslēdzošo pīlastru (9. attēls).

Ēku vaiņagojošā dzega ir pasmaga, bet ne pārāk izvirzīta. To daiļo balstekļi jeb zobrievojums. Virs dzegas parasti paceļas stāvs mansarda jumts. Retāk sastopama kompozīcija, kurā virs galvenās dzegas vēl novietots zems attikas stāvs. Tas vertikālā

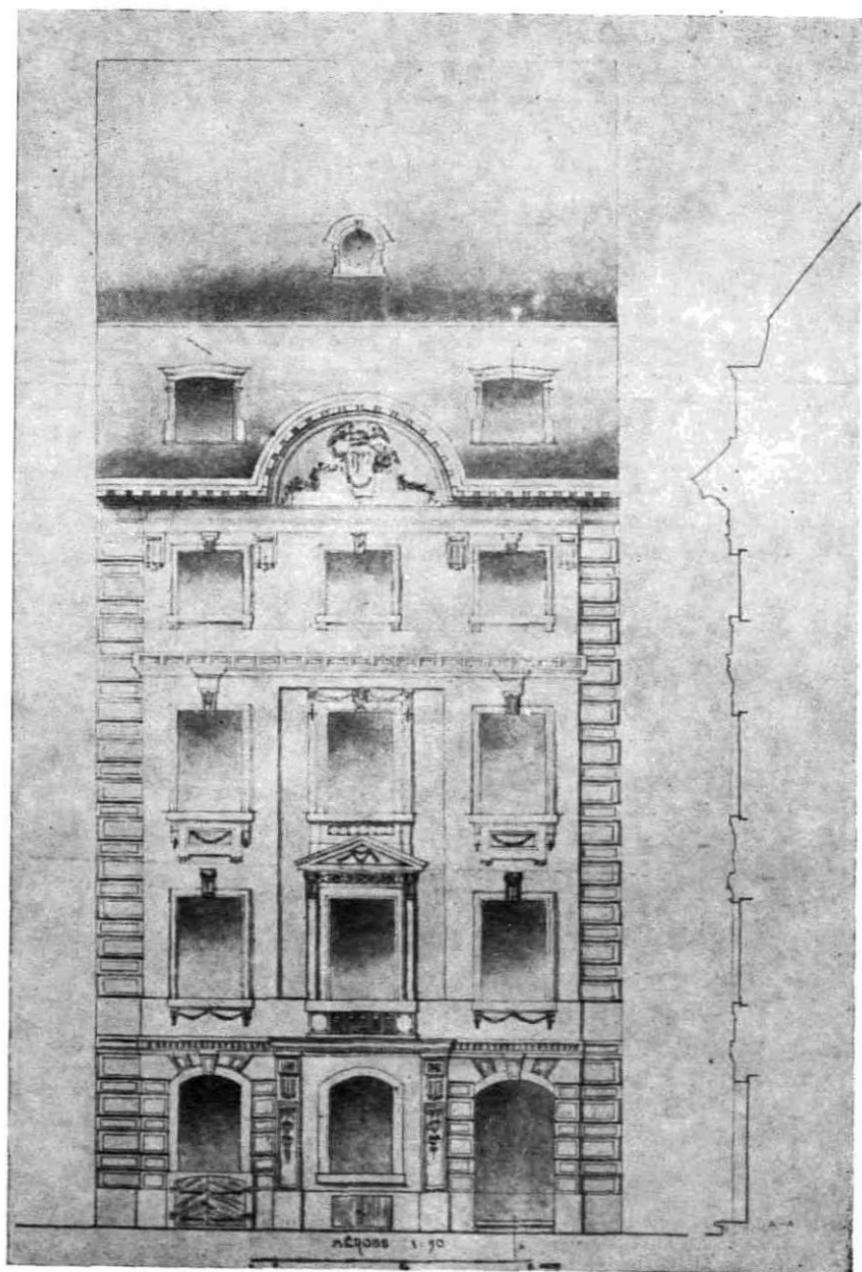


14. attēls. Nams Miesnieku ielā Nr. 1 (LVU arhitektūras nodaļas arhīvs).

¹ 1512—1570.



15. attēls. Nams L. Pils ielā Nr. 9 (autora Vecrigas foto arhivs).



16. attēls. Nams Vecpilsētā Nr. 17 (LVU arhitektūras nodaļas arhīvs).



17. attēls. «Resurs» biedrības ēka (autora V. R. foto arhivs).

dalījumā saskaņots ar vidējiem diviem galvenajiem stāviem (11. attēls).

Vairums Haberlanda ēku fasades noslēdz mierīga dzegas horizontale. Izņēmuma gadījumā sastop nelielus dekoratīvus trīsstūra apveida zelmiņus vai pasmagas attikas sienas. Vienīgi namam Vecpilsēta 17. dzegu prātrauc pusloka apveida zelminis, ko daiļo nama īpašnieka ģerbonis (16. attēls).

Haberlands pārstāj Rīgas klasicisma agrīno posmu. Viņa fasadu veidojumos sastop vēl baroka atskaņas.

Izjustie formu un plastikas principi, kas saskatāmi viņa fasadu kompozīcijās, pasargā tās no kanonizēta akademisma.

Apcerējuma nolūks nav vis analizēt visas pazīstamās Haberlanda dzīvojamu ēku fasades kompozīcijas, bet gan sniegt tikai raksturīgākos piemērus un atrast šķietamā daudzveidībā kopīgos izteiksmes līdzekļus.

Haberlanda lietotā fasades kompozīcijas pamatschema saskaņā vienā otrā Vecrīgas nama arhitektoniskā apdarē.

Rustiem pārklātais zokoļa stāvs ar bagātu logailu apbūvi izceltie vidusstāvi un mazām logailām augšstāvā — visi šie elementi, tādā pat sakārtojumā ir raksturīgi Haberlanda fasadēm. Trūkst tikai radošās izdomas un formu smalkums, kas valdzina Haberlanda celtnēs.

Rīgas klasicisma mākslas pēdējais ampīra stila posms attīstījās Aleksandra laikmeta Krievijas klasicisma ietekmē. Novirziena ievērojamākais pārstāvis bij Haberlanda pēctecis amatā — Rīgas būvmeistars Daniels Gotfrīds (1768—1831). Rīgā tas strādāja kopš 1789. gada. Ar Gotfrīda vārdu ir saistīta buržuaziskās Latvijas laikā nosauktā Saviesīgās Biedrības «RESURSA» ēka ratslaukumā (17. attēls).

Vēlina Krievijas klasicisma ampīra posma uztvere izpaužas noteiktā asi-šķautnainā būvķermeņa veidojumā, gludā sienu virsmu apdarē un skopā, bet gaumīgā ornamentālā dekora lietošanā. Tāpta raksturīga ampīram ir no dorikas patapinātā frīza josla un moduljoniem daiļotā dzega.

Krievu ampīra atspulgs ir saskatāms monumentālā kara reSORa noliktavas ēkā, kas ir radniecīga Vladimira Petroviča Stasova provianta noliktavām Maskavā.

Tas pats ir sakāms par tagad jau nosauktās «Bruņu Tiesas» ēkas fasadi¹ un pilsētas «Aptiekas celtni»² (sk. 18. attēlu).

Rīgas baroka un klasicisma posma dzīvojamo ēku celtniecība vērtējama gan no tā laika pozīcijām, gan mūsu laikmeta lietderības viedokļa.

Pilsoņu dzīvojamie nami ietvēra Vecās Rīgas viduslaiku

¹ Ēka atradās Jaunavu ielā 9.

² Ēka atradās Komjaunatnes ielā pie Jēkaba baznīcas.

ielīņas. Celtnu augstums nesniedzās pāri trim, retums, četriem stāviem.

No pretējās ielas puses ikkatra fasades dekoratīvā sīkdaļa bija labi saskatāma.

Astoņpadsmitā gadsimta dzīves temps bija mēreni mierīgs. Motors vēl nebija aizstājis zirgu. Garāmgājējam, pat braucējam bija laika diezgan aplūkot un apbrīnot ēku dekoratīvo ietērpju.

Tas bija laiks, kad prata pienācīgi novērtēt amatnieka darbu un no šī viedokļa raugoties namu fasadu dekoratīvie darinājumi ir nevainojami.

Der atcerēties, ka ēku fasades pagājušajos gadsimtos būs neskaitāmas reizes pārkrāsotas. Ornamentu asums ir zudis. Tie šodien ir zaudējuši kādreizējo precizitāti un svaigumu. To aptuveni var izjust, iedziļinoties attēlotajos uzņēmumos (piem. 12., 13. u. c. att.), kuros ornamentu dekoratīvā iedarbība ir nenoliedzama.

Pilsoņu dzīvojamās ēkas cienīgi reprezentēja sava laika pilsētas arhitektūras sniegumus. Viņos arhitektoniska progresīvā doma un amatnieciskā māka devusi augstvērtīgus risinājumus.

Šīm pozitīvām vērtībām neder pāriet vienkārši garām. Tās pārvērtējamas, izejot no tagadnes prasībām, no mūsdienu dzīves ritma, no motorizētas kustības, no rūpnieciskā ceļā izgatavotajiem celtnu elementiem.



18. attēls. Pilsētas aptiekas ēka (autora V. R. foto archivs).

Būtu jau daudz kas sasniegts, ja pašreizējā dzīvojamo ēku celtniecība tik pat lielā mērā apmierinātu mūsu laikmeta praktiskās un estētiskās prasības, kā to spēja veikt Rīgas baroka un klasicisma posmā būvētie dzīvojamie nami.

ПРИЕМЫ КОМПОЗИЦИИ ФАСАДОВ ЖИЛЫХ ДОМОВ РИЖСКОГО БАРОКО И КЛАССИЦИЗМА

В 1201 году епископ Альберт избрал базой для дальнейших завоеваний торговое селение ливов, которое находилось на территории нынешнего города Риги. В XIII и последующих веков были построены церкви, которые по сегодняшний день создают своеобразный силуэт города. Средневековые сооружения жилищной архитектуры до нас не дошли. О том времени свидетельствует лишь сложная сеть улиц старого города и узкие и глубокие строительные участки.

Хорошее представление о структуре средневековой Риги дает план города от 1500 года, составленный профессором Страубергом. План является результатом тщательных научных исследований. Сравнивая план Страуберга с современным планом старого города видно, что величина и форма строительных участков за последние 4½ столетия почти не изменилась. Если структуре города присуще такой консервативный характер, то можно с уверенностью сказать, что общая схема планировки города в 17 веке также не отличалась от данных упомянутого плана (рис. 1).

В этом столетии в архитектуре Риги появляется стиль бароко. Прошло сто лет с лишним пока зародившееся в Италии бароко дошло до Риги. Во время дальнего пути бароко лишается своей специфики и становится сдержанным и умеренным.

В духе северной интерпретации бароко перестраиваются как общественные так и гражданские здания (рис. 2). Модернизации подвергался главным образом фронтон здания и его портал (рис. 3). Недавно восстановленный дом по м. Пилс ул. 19, является характерным представителем дома ремесленника того времени (рис. 4). Более богатые очертания рижских барочных фронтонов сохранились лишь в зарисовках (рис. 5 и 6).

И в том и в другом случае пластика архитектурных элементов сведена к минимуму. К концу 17-го века появляются дома при-
мыкающие к улице не торцом, а боковым фасадом. Последний
украшался пилястрами т. н. палладианским большим орденом,
объединяющим все три этажа дома (рис. 7 и 8).

Бароко сменяется классицизмом. Виднейшим представителем его ранней фазы является городской архитектор Хаберланд (1749—1803). С его именем связаны лучшие примеры Рижской гражданской архитектуры того времени. О планировочном решении говорить трудно, ибо дома зачастую радикально перестраивались. Большинство построенных домов имеют 3—4 этажа. Рустованный цокольный этаж отделен промежуточным карнизом от верхних этажей. Стены украшены хорошо прорисованным орнаментом, медалионами или разделены пилястрами большого ордера (рис. 9—13).

Угол решается скошенным под 45° и украшается балконом или трехчетвертной колонной, которая смягчает его грань (рис. 14, 15). Формы всегда хорошо прочувствованы и лишены сухости и академизма.

Представитель классицизма в фазе его дальнейшего развития является преемник Хабарланда на должности городского архитектора — архитектор Готфрид (1768—1831). Его творчество находится под влиянием русского классицизма Алаксандровского времени (рис. 17, 18).

A. K. DUMPIS, techn. zin. kand.

V. J. GRĪSLIS, techn. zin. kand.

NESTACIONARA SILTUMA APMAIŅA BIMETALISKĀ TERMORELEJĀ.

Lai nodrošinātu kādā sistēmā normalu siltumapmaiņu starp sildķermeni un apkārtējo vidi, un uzturētu telpā nemainīgu temperatūru, lieto automatiski darbojošos regulatorus, kurus iedarbina šim nolūkam pielāgoti termoreleji.

Atkarībā no vidē ieturamās temperatūras režīma, ieregulē termoreleju, kas darbojas kā impulsa devējs. Par izpildorganu parasti izmanto elektropalaidējus vai ventilus, kas pēc vajadzības attiecīgi palielina vai samazina pievadāmās siltuma plūsmas intensitāti apsildāmā sistēmā. Par impulsa devēju šādās sistēmās arvien biežāk pielieto bimetaliskos termorelejus.

Šo termoreleju konstrukcijas līdz pat pēdējam laikam izstrādāja pamatojoties galvenokārt tikai uz empiriskiem datiem.

Sinī darbā apskatīti daži jautājumi, kas skar siltuma apmaiņu termoreleja bimetaliskā plāksnītē nestacionara režīma gadījumā. un mēģināts dot aprēķina metodiku, kuru varētu pielietot jaunu termoreleju aprēķināšanai un konstruēšanai konkrētiem regulēšanas nosacījumiem.

Siltumapmaiņas process temperatūras regulatora termorelejā.

Atbildīgais elements automatiskā temperatūras regulatora shēmā ir impulsa devējs. Izmēģinot termoregulatorus, kuros par impulsa devēju ir bimetaliskais termorelejs, dabūjam datus, kas raksturo nestacionāro siltumapmaiņas procesu starp termoreleja bimetalisko plāksnīti un apkārtējo gaisu, ja tā temperatūra ir mainīga.

Gaisa temperatūrai paaugstinoties, termoreleja temperatūra pieaug, un pēc noteikta laika τ , tā kļūst vienāda ar apkārtējās vides — gaisa temperatūru. Teoretiski, pilnīga temperatūru izlīdzināšanās starp plāksnīti un gaisu notiks ļoti lēni. Praktiski var pieņemt, ka siltuma apmaiņas režīma stabilizācija notiek galīgā laika periodā τ , kur beigās paliek temperatūras diference Δt starp plāksnītes masu un apkārtnes gaisu.

Analitiski šo laika periodu τ un Δt var atrast pēc prof. Krella formulām:

$$\tau = \frac{\beta}{0,693} \cdot \ln \frac{t_{reg} - \vartheta \cdot \frac{\beta}{0,693}}{\Delta t - \vartheta \cdot \frac{\beta}{0,693}} \text{ sek} \quad (1)$$

$$\Delta t = \vartheta \cdot \frac{\beta}{0,693} \cdot (1 - 0,5^{\frac{\tau}{\beta}}) + t_{reg} \cdot 0,5^{\frac{\tau}{\beta}} \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (2)$$

β (sek) — termoreleja jūtīguma koeficients,

Δt ($^{\circ}\text{C}$) — temperatūras diference starp bimetalisko plāksnīti un apkārtnes temperatūru nestacionārā procesa beigās,

ϑ ($\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{sek}}$) — temperatūras izmaiņa apkārtējā vidē 1 sekundē,

t_{reg} ($^{\circ}\text{C}$) — regulējamās vides temperatūra.

Termoreleja jūtīguma koeficientu β nosaka eksperimentālā ceļā (sk. 1. tabulu); to izsaka ar laiku sekundēs, kāds vajadzīgs, lai bimetaliskās plāksnītes un apkārtnes sākuma temperatūras diference samazinātos 2 reizes.

1. zīmējumā parādīta eksperimentālās iekārtas principālā shēma, uz kuras tika noteikta vairāku tipu termoreleju kūrība (jūtīgums).

Pārbaudāmais termorelejs ievietots stikla kamerā (1). Kameru silda ar elektrisko spuldzi (5), temperatūras maiņu kamerā nosaka ar kontroles termometru (3). Kameras uzsildīšana tiek izdarīta ļoti lēni, jo jāpānāk, lai pētāmais objekts vienmērīgi sasiltu. Temperatūru kamerā un ārpus tās mēri ar laboratorijas tipa dzīvsudraba termometriem (3) un (4) kuru skalas iedalījums $0,1^{\circ}\text{C}$.

Plāksnīšu uzsildīšanas pakāpi kontrolē ar divām vara termopāram un spoguļgalvanometri (2) (tipu M-21a).

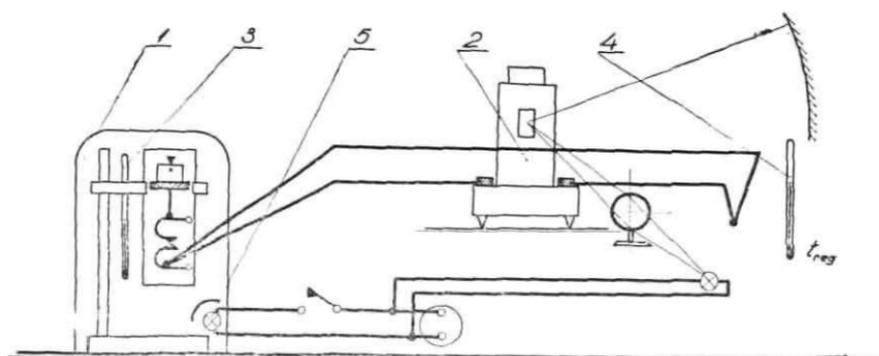
Pēc stacionāra režīma iestāšanās kamerā, vienlaicīgi ieslēdz stoppulksteni un termorelejam noņem stikla kameru — pārsegu. Ar šo momentu sākās termoreleja atdzišana. Šinī laikā izdara

Termoreleju tehniskie dati

1. tabula

Nr. p. k.	Termoreglatora nosaukums	Mimetāliskās plāksnītes izmēri			Bimetā- liskās plāksnītes svars g	Attiecība $\frac{F_{imp}}{V_{imp}}$ $\frac{1}{mm}$	Jūtīguma koeficients		Termiskais raksturotājs α plāksn.	Ekranizācijas koeficients ψ
		garums a mm	platums b mm	biezums c mm			β plāksn.	β l. reg.		
1.	Теплосети Мосэнерго	142	9,4	0,7	7,9	3,084	80	900	25,8	11,25
2.	ДТ-2	57,5	2,1			5,987				
	a) temperatūras izmai- ņas ātruma regulators	68,0	4,3	0,4	0,9	5,495	62	225	49,2	3,68
	b) temperatūras regu- lators	117,5	2,1	0,4	0,8	5,969				
3.	ДТ-4									
	a) temperatūras izmai- ņas ātruma regulators.	57,5	8,4	0,5	2,3	4,264				
	b) temperatūras regu- lators	114,0	6,1	0,35	2,1	6,060	35	80	50,5	2,29

nolasījumus bimetaliskas plaksnītes temperatūras izmaiņai pēc laika.



1. zīm. Eksperimentālās iekārtas principiālā schema:

1 — pētāmā priekšmeta uzsildīšanas kamera; 2 — galvanometrs; 3 un 4 — kontroles termometri; 5 — elektriskā spuldze.

Pēc šādas metodes tika noteikta t. s. siltuma kūtrība diviem dažādu tipu termorelejiem un trim termometriem:

- 1) Termorelejā (tips Tjeplosetji Mosenergo)
- 2) Termorelejā (tips ДТ-2)
- 3) telpu termometram (paraugs Nr. 1) temperatūru diapazonam no $0^{\circ}\text{C} \dots +50^{\circ}\text{C}$
- 4) Telpu termometram (paraugs Nr. 2) temperatūru diapazonam no $-5^{\circ}\text{C} \dots +37^{\circ}\text{C}$ un
- 5) laboratorijas tipa dzīvsudraba termometram temperatūru diapazonam no $0^{\circ}\text{C} \dots +50^{\circ}\text{C}$ (ar skalas iedaļām $0,1^{\circ}\text{C}$).

Apstrādājot iegūtos datus, sastādīta diagrama (2. zīm.) Δt noteikšanai atkarībā no vērtības ϑ . Skaitliskās Δt vērtības izskaitļotas pēc formulas (3).

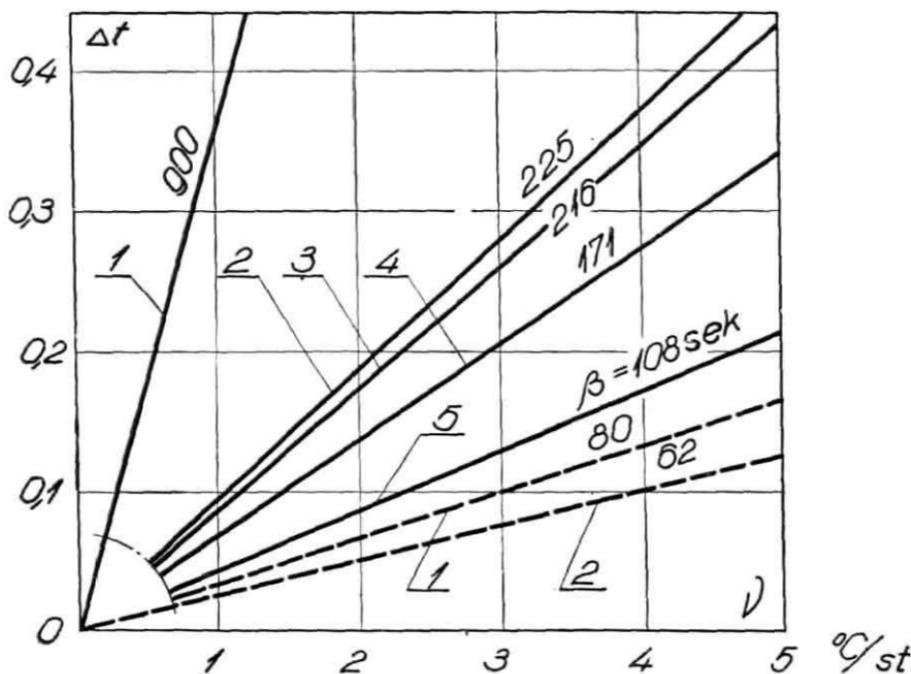
$$\Delta t = \vartheta \cdot \frac{\beta}{0,693} \Delta^{\circ}\text{C} \quad (3)$$

No diagramas (2. zīm.) izriet, ka termoreleja jūtīgums ir ievērojami atkarīgs no tam uzliktā apvalka konstruktīvā izveidojuma, kas stipri ietekmē visas ierīces jūtīgumu. Tā piemēram, Mosenergo tipa termoreleja (ar uzliktu apvalku) regulēšanas

kļūda palielinās desmitkārtīgi (no $0,1^{\circ}\text{C} \dots 1,08^{\circ}\text{C}$, ja $\vartheta = 3 \left(\frac{\text{gradi}}{\text{st}}$),

bet ДТ-2 tipa termoreleja tikai $\sim 3,5$ reizes (no $0,075^{\circ}\text{C} \dots 0,271^{\circ}\text{C}$ pie tā paša ϑ), ja salīdzina šos termorelejus darbībā ar noņemtiem apvalkiem.

Lai noteiktu bimetaliska termoreleja izdevīgāko formu, tika izpētīts nestacionarais (atdzišanas periods) siltuma apmaiņas process starp impulsa devēja jutīgo elementu (plāksnīti) un apkārtnes gaisu.



2. zīm. Temperatūru diference starp jutīgo elementu un apkārtējo vidi nestacionāra procesa stabilizācijas periodā: $\Delta t = i(\frac{1}{\beta})$ °C.

Impulsa devēja bimetaliskās plāksnītes (jutīgais elements) temperatūru atdzišanas periodā izskaitļo pēc formulas [3]

$$t_{imp} = \frac{x}{x - \frac{q}{W}} \cdot (t_{reg} - t_{ar} - \frac{Q}{q}) \cdot (e^{-\frac{q}{W}} - 1) \text{°C} \quad (4)$$

$x \left(\frac{1}{\text{st}} \right)$ — impulsa devēja jutīgā elementa termiskais raksturotājs

$$x = \frac{F_{imp}}{R_{imp} \cdot c_{imp} \cdot V_{imp} \cdot b_{imp}} \left(\frac{1}{\text{st}} \right) \quad (5)$$

$F_{imp} \text{ (m}^2\text{)}$ — impulsa devēja jutīgā elementa plāksnītes virsmas laukums,

$V_{imp} \text{ (m}^3\text{)}$ — impulsa devējas plāksnītes tilpums,

$R_{imp} \left(\frac{\text{m}^2 \text{st} \cdot \text{grads}}{\text{kcal}} \right)$ — impulsa devēja plāksnītes termiskā pretestība,

$\gamma_{imp} \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)$ — impulsa devējas plāksnītes materiāla tilpuma vienības svars,

$c_{imp} \left(\frac{\text{kcal}}{\text{kg} \text{ grads}} \right)$ — impulsa devējas plāksnītes īpatnējā siltumietilpība,

$t_{reg} (^{\circ}\text{C})$ — regulējamās vides temperatūra uzsilšanas procesu sākumā,

$t_{ār} (^{\circ}\text{C})$ — temperatūra ārpus regulējamās vides,

$q \left(\frac{\text{kcal}}{\text{st} \text{ grads}} \right)$ — siltums, ar kuru kompensē apskatāmās sistēmas stundas siltuma zudumus, ja temperatūras diference ir 1°C (te ieskaitīti zudumi ar ventilāciju un infiltrāciju),

$Q \left(\frac{\text{kcal}}{\text{st}} \right)$ — regulējamai videi nestacionārā siltumapmaiņā pievadītais (patērētais) kopējais siltuma daudzums,

$W \left(\frac{\text{kcal}}{\text{st}} \right)$ — regulējamā vidē novietotos priekšmetos akumulētais siltuma daudzums.

No vienādojuma (4) redzams, ka α vērtībai pieaugot, palielinās arī termoreleja jūtīgums, t. i. samazinās regulatora kūtrība, tādēļ ierīce straujāk reaģēs dotās vides temperatūras svārstībām.

Tā kā koeficients α ietver sevī rindu fizikālo lielumu, tad izdarot to analīzi konkrētam gadījumam atrodam, ka dažus no tiem, piemēram γ_{imp} , c_{imp} , vai doto temperatūru robežās daļēji arī R_{imp} var pieņemt par nemainīgiem, t. i.

$$\gamma_{imp} = 7850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$c_{imp} = 0,111 \frac{\text{kcal}}{\text{kg} \text{ grads}} \text{ un}$$

$$R_{imp} = \frac{1}{\alpha_{imp}} \approx \frac{1}{1,5} = 0,1333 \dots \frac{\text{m}^2 \text{st} \text{ grads}}{\text{kcal}}$$

$\alpha_{imp} \left(\frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \text{st} \text{ grads}} \right)$ — siltuma pārejas koeficients starp impulsa devēju plāksnīti un gaisu ($\alpha \approx 6,7 \dots 8,0 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \text{st} \text{ grads}}$).

Tādēļ impulsa devējas plāksnītes termiskais raksturotājs α ir:

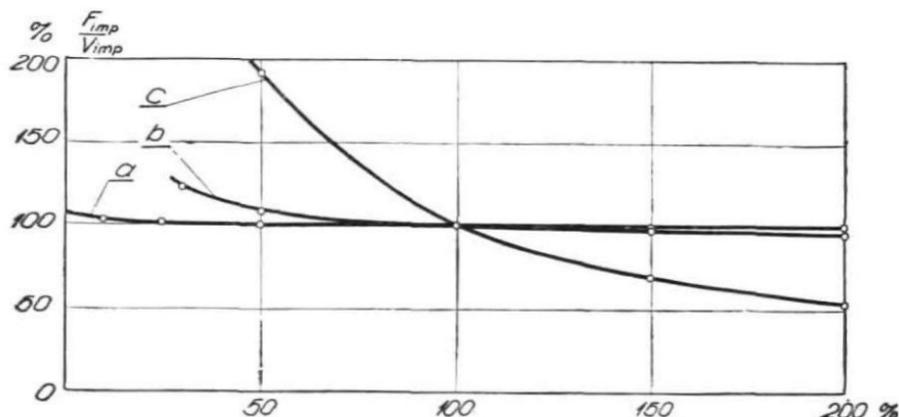
$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{1}{R_{imp} \cdot c_{imp} \cdot \dot{V}_{imp}} \cdot \frac{F_{imp}}{V_{imp}} = \frac{1}{0,1333 \cdot 0,111 \cdot 7850} \cdot \frac{F_{imp}}{V_{imp}} = \\ &= \frac{1}{115,67955} \cdot \frac{F_{imp}}{V_{imp}} = 0,008645 \frac{F_{imp}}{V_{imp}} \left(\frac{1}{st} \right) \text{ jeb} \\ \alpha &= \frac{1}{R_{imp} \cdot c_{imp} \cdot \dot{V}_{imp}} \cdot \frac{F_{imp}}{V_{imp}} = A \cdot \frac{F_{imp}}{V_{imp}} \left(\frac{1}{st} \right) \quad (5a) \end{aligned}$$

Tā kā F_{imp} un V_{imp} nosakāmi pēc termoregulatora bimetaliskās plāksnītes ģeometriskiem izmēriem (garuma — a , platuma — b un biezuma — c), tad vienādojumu (5a) var rakstīt šādi:

$$\alpha = A \cdot \frac{F_{imp}}{V_{imp}} = A \cdot \frac{2 \cdot (a \cdot b + a \cdot c + b \cdot c)}{a \cdot b \cdot c} \left(\frac{1}{st} \right) \quad (5b)$$

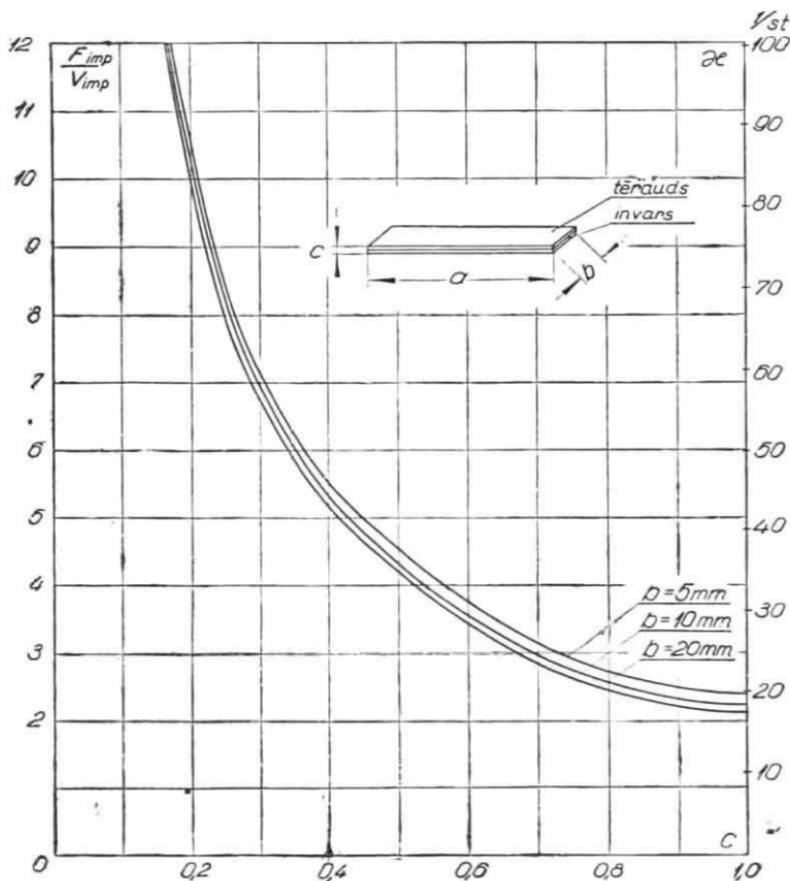
No pēdējās izteiksmes izriet, ka impulsa devējas plāksnītes termiskā raksturotāja α izmaiņu nosaka bimetaliskās plāksnītes ģeometriskie izmēri. Tādēļ α palielināšanās noteikšanai ir jānoskaidro plāksnītes ģeometrisko izmēru (a , b un c) izmaiņas ietekme uz attiecību $\frac{F_{imp}}{V_{imp}}$.

3. zīmējumā parādīti šīs analīzes rezultāti.



3. zīm. Attiecības $\frac{F_{imp}}{V_{imp}}$ maiņas atkarība no bimetaliskās plāksnītes ģeometriskiem izmēriem a , b un c .

No diagramis redzams, ka plāksnītes garums a neietekmē attiecību $\frac{F_{imp}}{V_{imp}}$; plāksnītes platuma b samazināšana praktiski maz ietekmē $\frac{F_{imp}}{V_{imp}}$ palielināšanos, bet attiecības $\frac{F_{imp}}{V_{imp}}$ maiņu stipri ietekmē plāksnītes biezums c . Izrādās, ka jo plānāka ir bimetāla plāksnīte, jo lielāka ir $\frac{F_{imp}}{V_{imp}}$ attiecība.



4. zīm. Termiskā raksturotāja α un attiecības $\frac{F_{imp}}{V_{imp}}$ atkarība no plāksnītes ģeometriskiem izmēriem: $\alpha = f(a, b, c)$; $\frac{F_{imp}}{V_{imp}} = \varphi(a, b, c)$.

Pēc 4. zīmējumā parādītās diagrammas var izvēlēties bimetaliskās plāksnītes izmērus, atkarībā no α , vai attiecības $\frac{F_{imp}}{V_{imp}}$. (Diagrama sastādīta materialam: invars — tērauds).

Mēģinājumu rezultāti, kas dabūti ar Mosenergo un ДТ-2 tipa termorelejiem parāda, ka bimetala plāksnīšu temperatūras izmaiņas gaita izsakāma ar eksponentvienādojumiem [2], izmantojot Bio (Bi) un Furjē (Fo) kritērijus:

uzsildīšanas periodam

$$t_{\tau} = t_0 \cdot (1 - e^{-\mu \cdot Bi \cdot Fo}) \quad (6)$$

atdzišanas periodam

$$t_{\tau} = t_0 \cdot e^{-\mu \cdot Bi \cdot Fo} \quad (7)$$

t_{τ} (°C) — temperatūra laika momentā τ no uzsildīšanas resp. atdzišanas procesa sākuma,

t_0 (°C) — temperatūra mēģinājuma sākuma momentā ($\tau=0$).

Vienādojumos (6) un (7) Bio kritērijs ($Bi = \frac{\alpha}{\lambda} \cdot l$) raksturo reducēto siltuma pārejas koeficientu, bet Furjē kritērijs ($Fo = \frac{a \cdot \tau}{l^2}$) — funkcijas maiņu pēc laika.

μ — proporcionalitātes koeficients.

Noskaidrojot abu kritēriju reizinājumu (Bi · Fo) fizikālo jēgu:

$$Bi \cdot Fo = \frac{\alpha}{\lambda} \cdot l \cdot \frac{a}{l^2} \cdot \tau = \frac{\alpha}{\lambda} \cdot l \cdot \frac{\lambda}{c \cdot \gamma} \cdot \frac{\tau}{l^2} \cdot \frac{l}{l} =$$

$$\frac{\alpha}{c \cdot \gamma} \cdot \frac{l^3}{l^2} \cdot \tau = \frac{1}{\frac{1}{\alpha} \cdot c \cdot \gamma} \cdot \frac{F}{V} \cdot \tau = A \cdot \frac{F}{V} \cdot \tau = \alpha \tau$$

atrodam, ka tas izsaka jūtīgā elementa (plāksnītes) termisko raksturofāju α pareizinātu ar τ . Tādēļ temperatūras funkciju vienādojumā (6) un (7) uz termoreleja elementa bimetala jūtīgās virsmas izsakāmi šādi:

uzsildīšanas periodā:

$$t_{\tau} = t_0 \cdot (1 - e^{-\alpha \cdot \tau}) \quad (6a)$$

atdzišanas periodā:

$$t_{\tau} = t_0 \cdot e^{-\alpha \cdot \tau} \quad (7a)$$

Ievērojot, ka pēc definīcijas jūtīguma koeficients β tika izteikts ar pusi no laika, kāds vajadzīgs, lai dabūtu temperatūras pirmo starpību starp bimētala plāksnīti un faktisko apkārtējās vides temperatūru, varam dabūt jaunas sakarības. Piemēram, plāksnītes atdzišanas stadijai pēc formulas (7a)

$$\frac{t_{\tau}}{t_c} = e^{-\alpha \cdot \tau}$$

pie $\tau = \beta$, šī attiecība ir

$$\frac{t_{\tau}}{t_c} = \frac{1}{2} = e^{-\alpha \cdot \beta} \quad (8)$$

Tā kā termiskā raksturotāja dimensija ir st^{-1} , bet β izteikts sekundēs, tad izsakot 8. formulā pakāpes rādītāju $\alpha \cdot \beta$ vienādās laika vienībās dabū:

$$e^{-\frac{\alpha \cdot \beta}{3600}} = \frac{1}{2}, \text{ vai}$$

$$\alpha \cdot \beta = 3600 \cdot \frac{\lg 2}{\lg e} = 3600 \cdot \frac{0,30103}{0,43429} = 2495,$$

$$\text{t. i. } \alpha \cdot \beta = 2495 = \text{const} \quad (9)$$

Izmantojot (9) vienādojumu var atrast katram laika momentam τ termiskā raksturotāja faktisko vērtību $\alpha_{t,rel}$ un pēc tam termoreleja bimetaliskās plāksnītes precīzo temperatūru $t_{t,rel}$ katram laika momentam τ pēc vienādojuma [4]

$$t_{t,rel} = \frac{\alpha_{t,rel}}{\alpha_{t,rel} - \frac{Q}{W}} \cdot \left(t_{ie} - t_{ar} - \frac{Q}{q} \right) \cdot \left(e^{-\frac{q}{W}} - 1 \right) ^{\circ\text{C}} \quad (10)$$

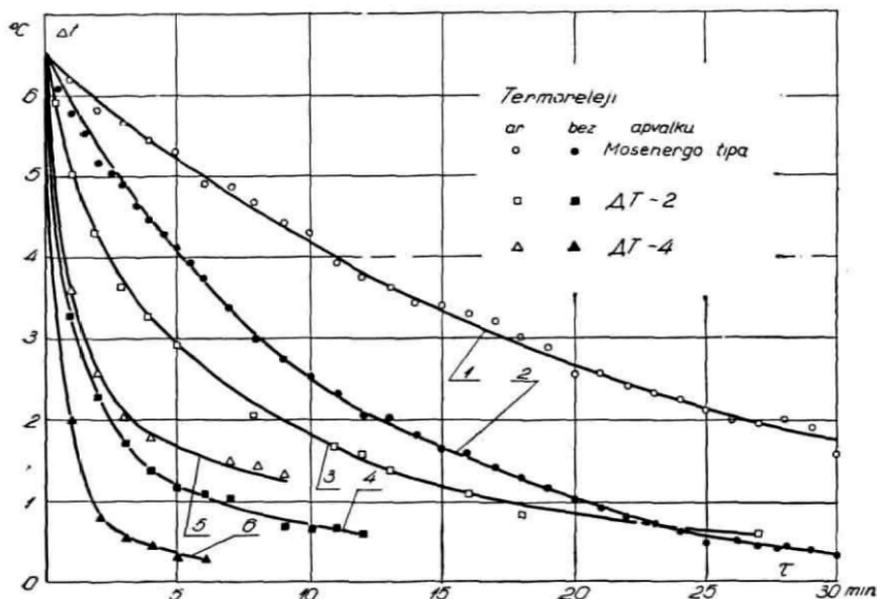
vērtības $\beta_{t,rel}$ var atrast pēc vienādojuma

$$\beta_{t,rel} = \psi \cdot \beta_{imp} \quad (11)$$

ψ — termoreleja ekranizācijas koeficients. Realās konstrukcijās $\psi = 2 \dots 11$

1. tabulā sakopoti aprēķināšanas un eksperimentālā ceļā dabūtie tehniskie dati dažādu tipu termoregulatoru termorelejiem.

Salīdzinot tabulā pievestos lielumus redzams, ka ДТ-4 tipa termorelejs pēc darbības rādītājiem ir jūtīgāks temperatūras svārstībām. Lai teikto pastiprinātu, 5. zīmējumā parādīta eksperimentālā ceļā dabūtā diagramma par temperatūras izmaiņu impulsa devēja plāksnītes apkārtējās vides temperatūras pazemināšanās laikā: variantiem ar termoregulatoram noņemtu apvalku (5. zīm. līknes 2, 4 un 6), un normalā darba stāvoklī, ar uzliktu apvalku (5. zīm. līknes 1, 3 un 5).



5. zīm. Impulsa devēja plāksnītes temperatūras maiņas līknes apkārtējās vides atdzišanas periodā:

1 — Mosenergo termorelejam ar apvalku; 2 — Mosenergo termorelejam bez apvalka; 3 — ДТ-2 termorelejam ar apvalku; 4 — ДТ-2 termorelejam bez apvalka; 5 — ДТ-4 termorelejam ar apvalku; 6 — ДТ-4 termorelejam bez apvalka.

Secinājumi.

Mēģinājumu ceļā noteikts termoregulatoru jūtīgā elementa un apkārtējās vides siltuma apmaiņas procesa raksturs nestacionārā režīmā.

Noteikta termoreleja elementa ģeometrisko izmēru ietekme uz jūtīguma koeficientu β un termisko raksturotāju α .

Izstrādāta metode termoreleja bimetaliskas plāksnītes optimālo ģeometrisko izmēru noteikšanai, izejot no termoregulatora darba nosacījumiem.

А. К. ДУМПСИС, В. Я. ГРИСЛИС

НЕСТАЦИОНАРНЫЙ ТЕПЛОБМЕН В БИМЕТАЛЛИЧЕСКОМ ТЕРМОРЕЛЕ.

Исследованы опытным путем нестационарные процессы теплообмена термореле и окружающей среды.

Определено влияние измерения геометрических размеров чувствительного элемента термореле на его тепловую характеристику χ и коэффициент чувствительности β .

Разработана методика для определения оптимальных геометрических размеров, биметаллических пластинок исходя из условий работы термореле.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аше Б. М. Отопление, ч. I. Госстройиздат, 1939.
2. Соколов В. С. Нестационарный теплообмен в строительстве. Профиздат, 1953.
3. Вопросы энергетики, IV. Теплоснабжение, АН Латв. ССР, 1956.

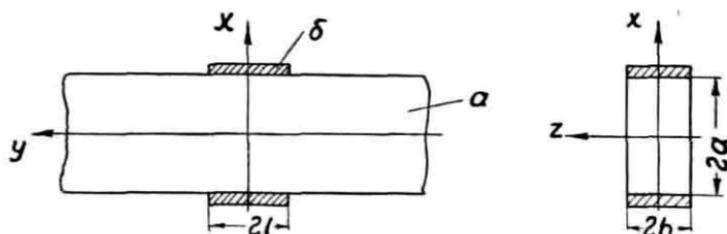
К. К. ТАБАКС, доцент, кандидат технических наук

РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО НАСОСА ПОСТОЯННОГО ТОКА¹

Значительный интерес в последнее время приобретают электромагнитные насосы, которые имеют широкие возможности применения в современной технике. Их изучению посвящен ряд работ, целью которых является создание теории и методики расчета насосов [1].

Для достижения этой цели необходимо знать распределение тока в горловине насоса. Эта задача может быть решена экспериментально [2] но в таком случае невозможно создать общую теорию насосов и их проектирование связано с опытными исследованиями. В настоящей статье дан аналитический расчет электрического поля в горловине насоса постоянного тока.

На фиг. 1 дана схема насоса постоянного тока [1].



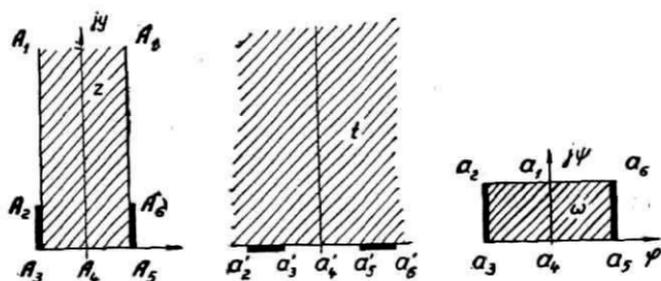
Фиг. 1.

Если ток направлен вдоль оси x , магнитный поток вдоль оси z , то вдоль оси y развиваются механические силы. Предполагая, что картина электрического поля не зависит от z , электрическое поле можно считать плоскопараллельным и при

¹ Задача предложена автору кандидатом техн. наук И. А. Тютиним

расчете его можно пользоваться методом конформных отображений. При расчете не учитывается влияние магнитного поля. Кроме того будем считать, что размеры электродов и сечения горловины значительно меньше чем ее длина.

Для расчета поля проведем конформное отображение плоскости ω на плоскость z , что дает возможность определить комплексный потенциал на плоскости z (фиг. 2).



Фиг. 2.

Для отображения плоскости t на z применением интеграла Кристофеля-Шварца получим общее выражение (Л. 3):

$$z = A \operatorname{arc} \sin t + B,$$

или в нашем случае

$$z = \frac{2a}{\pi} \operatorname{arc} \sin \left(t \operatorname{ch} \frac{\pi l}{2a} \right). \quad (1)$$

Плоскость ω конформно отображается на t общим выражением [3]:

$$t = C \operatorname{sn} \omega + D,$$

или в нашем случае

$$t = \frac{\operatorname{sn} \omega}{\operatorname{ch} \frac{\pi l}{2a}}, \quad (2)$$

где модуль эллиптической функции $\operatorname{sn} \omega$:

$$k = \frac{1}{\operatorname{ch} \frac{\pi l}{2a}}. \quad (3)$$

Тогда выражение комплексного потенциала в плоскости z будет:

$$z = \frac{2a}{\pi} \operatorname{arc} \sin (\operatorname{sn} \omega). \quad (4)$$

Справедливость выражения (4) проверена моделированием в электролитической ванне.

Напряженность электрического поля на плоскости z

$$E_z = E_\omega \frac{d\omega}{dz}.$$

Из выражения (4), учитывая свойства эллиптических функций [4], получим:

$$\frac{dz}{d\omega} = \frac{2a}{\pi} \frac{\sqrt{\operatorname{ch}^2 \frac{\pi l}{2a} - \sin^2 \frac{\pi z}{2a}}}{\operatorname{ch} \frac{\pi l}{2a}},$$

что дает возможность определить напряженность электрического поля на комплексной плоскости z :

$$E = \frac{\pi U}{4aK(k)} \cdot \frac{\operatorname{ch} \frac{\pi l}{2a}}{\sqrt{\operatorname{ch}^2 \frac{\pi l}{2a} - \sin^2 \frac{\pi(x+jy)}{2a}}}, \quad (5)$$

где: U — напряжение между электродами;

$K(k)$ — эллиптический интеграл первого рода;

$k = \frac{1}{\operatorname{ch} \frac{\pi l}{a^2}}$ — модуль эллиптического интеграла.

Наиболее наглядно свойства электрического поля характеризует изменение напряженности его вдоль оси y :

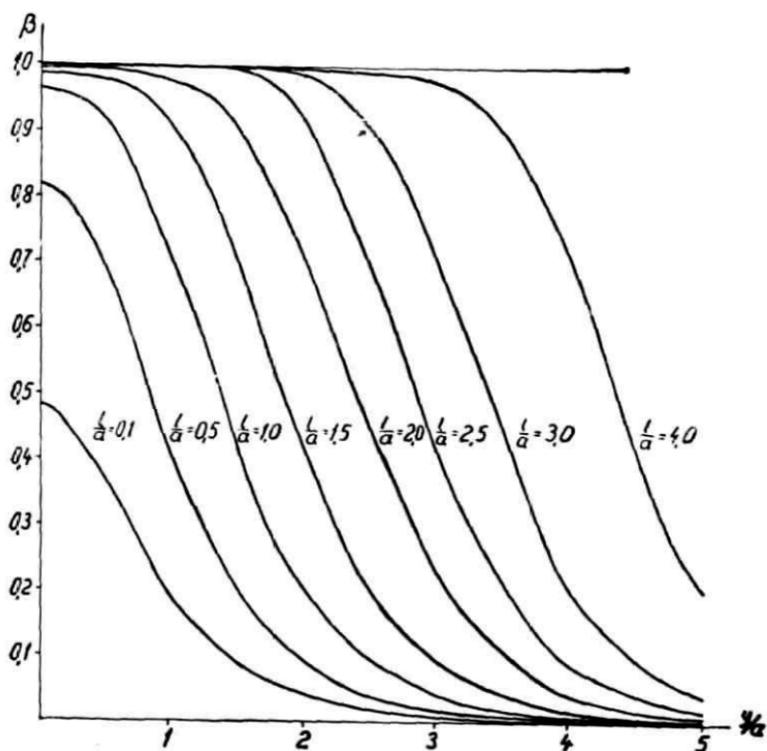
$$E_y = \frac{\pi U}{4aK(k)} \cdot \frac{\operatorname{ch} \frac{\pi l}{2a}}{\sqrt{\operatorname{ch}^2 \frac{\pi l}{2a} + \operatorname{sh}^2 \frac{\pi y}{2a}}}. \quad (6)$$

Для анализа изменения E_y выражение (6) перепишем следующим образом:

$$E_y = \frac{U}{2a} \beta.$$

На фиг. 3 дано β в зависимости от $\frac{y}{a}$ для различных $\frac{l}{a}$.

Полученные аналитические выражения потенциала и напряженности электрического поля позволяют произвести дальнейшие расчеты режимов работы насоса с учетом действительного распределения тока.



Фиг. 3.

ЛИТЕРАТУРА

1. И. А. Тютин, Э. К. Янкоп. Электромагнитные насосы для жидких металлов. Труды института физики АН Латв. ССР, VIII, 1956.
2. А. Н. Barnes, Direct Current Electromagnetic Pumps. «Nucleonics», 11, 1953, Nr. 1.
3. К. К. Табакс. Расчет электрических полей для некоторых задач высокочастотного нагрева. Труды Московского энергетического института. XIV, 1953.
4. Н. И. Ахнезер. Элементы теории эллиптических функций. Гостехиздат, 1948.

Э. К. ЯНКОП, ст. преподаватель

РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ И РЕЖИМА РАБОТЫ ЛИНЕЙНЫХ ИНДУКЦИОННЫХ НАСОСОВ

Введение

Полная методика расчета индукционных насосов для жидкого металла впервые предложена Я. Я. Лиелпетером и И. А. Тютиным [1]. Расчет некоторых параметров индукционного насоса и режима его работы дается также Д. А. Ваттом [2]. Этим и ограничивается весь список опубликованной литературы по данному вопросу.

Методики расчета насосов, предлагаемые в работах [1] и [2], существенно отличаются друг от друга и приводят к различным результатам. Различие обуславливается исходными условиями, которые положены в основу расчета.

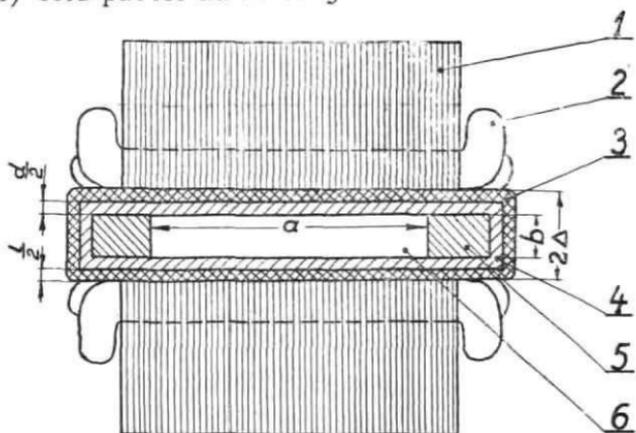
В работе [1] расчет высоты канала горловины b производится по формуле, полученной из условия минимума м. д. с. при изменении величины b , если давление p , производительность Q и прочие геометрические размеры горловины остаются неизменными:

$$b_1 = \frac{3}{8} \left\{ \frac{Q}{\tau f a} + \sqrt{\frac{Q}{\tau f a} \left[\frac{Q}{\tau f a} + \frac{16}{9} (l + d) \right]} \right\}. \quad (1)$$

Здесь:

- τ — полюсное деление индуктора;
- f — частота тока, питающего индукторы;
- a — ширина канала горловины;
- d — суммарная толщина двух стенок горловины, прилегающих к индукторам;
- l — общая толщина теплоизоляционных прокладок, размещенных в зазоре между индукторами (фиг. 1).

Если взять $b < b_1$, то для обеспечения требуемого давления p окажется необходимым увеличить индукцию и, следовательно, объем стали индукторов. Для $b > b_1$, величина индукции несколько снижается, но при этом линейный ток индукторов возрастает настолько, что требуемое увеличение объема паза больше объема, который освобождается вследствие ослабления магнитного поля. Это обстоятельство также приводит к росту объема стали индукторов. Таким образом, расчет по формуле (1) есть расчет на *минимум стали*.



Фиг. 1. Схема индукционного насоса.

1 — индукторы; 2 — обмотка; 3 — тепловая изоляция; 4 — горловина; 5 — медные шины; 6 — канал с жидким металлом.

Характер изменения токов и индукции в насосе при изменении зазора b показан на фиг. 2, где кривые построены для следующего частного случая:

$$p = 0,5 \cdot 10^5 \frac{\text{н}}{\text{м}^2}; \quad Q = 0,001 \frac{\text{м}^3}{\text{сек}}; \quad d = l = 0,002 \text{ м}; \quad \tau = 0,082 \text{ м};$$

$$a = 0,1 \text{ м}; \quad f = 50 \text{ гц};$$

длина индуктора $L = 0,5 \text{ м}$; электропроводность материала гор-

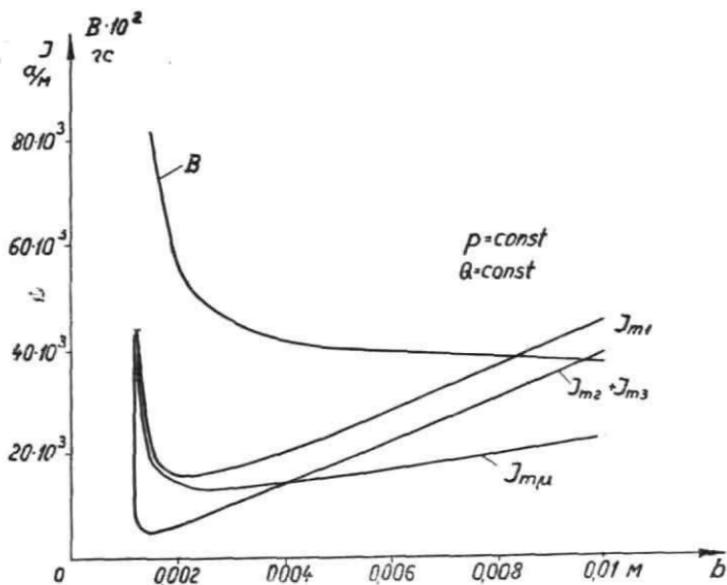
ловины $\gamma_2 = 10^6 \frac{1}{\text{ом} \cdot \text{м}}$; электропроводность жидкого металла

$$\gamma_3 = 10 \cdot 10^6 \frac{1}{\text{ом} \cdot \text{м}}.$$

Оптимальный размер b_1 , определенный по формуле (1), для этого случая равен $b_1 \approx 2,7 \text{ мм}$. Кривые построены по формулам (12), (13), (14) и (3), которые приводятся ниже.

В работе Д. А. Ватта [2] условие (25) можно сформулировать как условие минимума линейного тока при заданном давлении p .

Считая, что максимально допустимая плотность тока в обмотках индуктора есть величина постоянная, получим, что минимум линейного тока совпадает с *минимумом меди* в индукторах.



Фиг. 2. Зависимость индукции и токов в насосе от высоты канала горловины b .

B — действующее значение индукции в зазоре; J_{m1} — амплитуда линейного тока индукторов; J_{m2} , J_{m3} , J_{m4} — соответственно амплитуды намагничивающей и активной составляющих линейного тока.

Значит, расчет по Ватту (формула (25) в работе [2]) есть расчет на *минимум меди*.

Естественно, поэтому, что результаты вычислений по обоим рассматриваемым методам в общем случае совпадать не будут, т. к. каждый из этих методов имеет свою область применения.

Ясно, что число методов расчета насосов может быть значительно увеличено вследствие возможности постановки различных исходных условий.

Сейчас электромагнитные насосы проектируются в основном для теплоохлаждающих систем. Основное требование к таким насосам — их высокий к. п. д.

Требования же минимума меди или стали не являются главными. Поэтому актуальным является создание методики расчета насосов на максимум к. п. д.

Расчет на максимум к. п. д. дается в работе Ватта [2], но при выводе основных соотношений там не учитываются потери в обмотках индуктора, являющиеся одними из основных потерь в насосе.

Пренебрежение потерями в индукторах приводит к замене к. п. д. всего насоса к. п. д. только одного из элементов насоса—горловины.

Расчет же на максимум так называемого «к. п. д. горловины» может привести к весьма нерациональной и неэкономичной конструкции.

В настоящей статье делается попытка дать упрощенную методику расчета основных параметров индукционных насосов исходя из основного требования максимального к. п. д. насоса, а также несколько подробнее, чем в других работах, рассматриваются и другие исходные условия, которые могут иметь место в отдельных случаях. Методика расчета строится на основе оптимальных соотношений, имеющих место для насосов индукционного типа.

§ 1. Оптимальные соотношения в индукционных насосах

Под оптимальными мы будем понимать такие соотношения между электромагнитными и гидродинамическими величинами и конструктивными размерами насоса, при которых работа насоса наиболее эффективна.

Понятие эффективности зависит от конкретных требований, которые предъявляются к насосу. Например, под эффективной работой может пониматься работа при наивысшем к. п. д. (для непрерывно действующих установок), работа при максимальной производительности или максимальной отдаваемой полезной мощности (когда энергетическая сторона вопроса не играет важной роли) и т. п.

Каждому из подобных конкретных условий будут соответствовать свои оптимальные соотношения, которые и следует использовать при проектировании насоса.

Из многих возможных оптимальных соотношений ограничимся рассмотрением лишь следующих:

- 1) когда при заданной магнитодвижущей силе требуется максимально возможное давление (или, что то же самое, когда при заданном давлении насос должен иметь минимальную м. д. с.);

- 2) когда при определенном активном токе во вторичной цепи (в стенках горловины и в жидком металле) должно дости-

гаться максимально возможное давление (или: при заданном давлении требуется минимально возможный ток, индуктируемый бегущим полем);

3) когда при определенном токе в обмотке индуктора требуется получить максимально возможное давление (или: при заданном давлении требуется минимально возможный ток в обмотке индуктора);

4) когда при заданных давлении и производительности насос имеет максимальный к. п. д.

Как будет видно из дальнейшего, все эти соотношения получаются при наличии некоторых дополнительных ограничений, вследствие чего они являются в значительной мере условными. Полное отсутствие дополнительных ограничений в первых трех случаях неизбежно привело бы к бесконечно-большим значениям отдельных величин, что исключало бы возможность использования результатов для целей практики.

Для вывода формул используем результаты, полученные в работе [3] для случая малых зазоров между полюсами. Амплитуда магнитодвижущей силы:

$$M_m = \frac{4B_m \Delta}{\mu_0}, \quad (2)$$

где B_m — амплитуда индукции в зазоре,

Δ — половина зазора между полюсами,

μ_0 — магнитная проницаемость материалов, размещенных в зазоре между полюсами, принятая равной магнитной проницаемости пустоты; ч

давление, развиваемое насосом:

$$p = B_m^2 L \gamma_3 \tau f s \quad (3)$$

(s — скольжение);

амплитуда плотности тока в стенках горловины:

$$\delta_{m2} = 2B_m \gamma_2 \tau f; \quad (4)$$

мощность электрических потерь в стенках горловины (с учетом (3)):

$$P_2 = \frac{2pa \gamma_2 d \tau f}{\gamma_3 s}; \quad (5)$$

мощность электрических потерь в жидком металле:

$$P_3 = 2 p a b \tau f s; \quad (6)$$

мощность гидродинамических потерь в жидком металле (с учетом (2) и (3)):

$$P_4 = \frac{Q^2}{ab} \sqrt{\frac{2pLv\rho}{\tau fs}}. \quad (7)$$

Формула (7) справедлива для ламинарного течения. При турбулентном течении (что, вероятно, и будет иметь место в большинстве случаев) потери в жидкости на трение могут определяться по обычным формулам гидродинамики. Это подтверждается некоторыми экспериментами [4].

Между м. д. с. и намагничивающей составляющей линейного тока индукторов имеет место соотношение:

$$I_{\mu} = \frac{1}{2} \frac{\partial M}{\partial z}$$

Амплитуда намагничивающей составляющей:

$$I_{m\mu} = \frac{\pi}{2\tau} M_m = \frac{2\pi B_m \Delta}{\mu_0 \tau}$$

Амплитуда тока в стенках горловины, приходящегося на единицу длины горловины:

$$I_{m2} = \delta_{m2} d. \quad (8)$$

Из (4) и (8) получаем:

$$I_{m2} = 2B_m \gamma_2 d \tau f.$$

Амплитуда тока в жидком металле на единицу длины индуктора:

$$I_{m3} = \delta_{m3} b = 2B_m \gamma_3 b \tau fs.$$

Общий ток в индукторах на единицу длины индуктора:

$$\begin{aligned} I_{m1} &= \sqrt{I_{m\mu}^2 + (I_{m2} + I_{m3})^2} = \\ &= 2B_m \sqrt{\left(\frac{\pi \Delta}{\mu_0 \tau}\right)^2 + (\tau f)^2 (\gamma_2 d + \gamma_3 bs)^2}. \end{aligned} \quad (9)$$

Введем понятие коэффициента мощности горловины:

$$\cos \varphi = \frac{I_{m2} + I_{m3}}{I_{m1}}.$$

Подставляя в эту формулу значения токов из предыдущих выражений, получим:

$$\cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \left[\frac{\pi \Delta}{\mu_0 \tau^2 f (\gamma_2 d + \gamma_3 bs)} \right]^2}} \quad (10)$$

Общая мощность потерь в индукторах (пренебрегая потерями в железе) может быть представлена в виде:

$$P_1 = \frac{1}{2} I_{m1}^2 R,$$

где R — общее эквивалентное сопротивление обмоток индукторов.

На основании (9), будем иметь:

$$P_1 = 2B_m^2 R \left[\left(\frac{\pi \Delta}{\mu_0 \tau} \right)^2 + (\tau f)^2 (\gamma_2 d + \gamma_3 b s)^2 \right].$$

Используя формулы (2) и (3), выразим потери и токи через p и Q :

$$P_1 = \frac{2pR}{L\gamma_3 \tau f s} \left[\left(\frac{\pi \Delta}{\mu_0 \tau} \right)^2 + (\tau f)^2 (\gamma_2 d + \gamma_3 b s)^2 \right]; \quad (11)$$

$$I_{m1} = \frac{2\pi \Delta}{\mu_0 \tau} \sqrt{\frac{p}{L\gamma_3 \tau f s}}; \quad (12)$$

$$I_{m2} = 2\gamma_2 d \sqrt{\frac{p \tau f}{L\gamma_3 s}}; \quad (13)$$

$$I_{m3} = 2b \sqrt{\frac{p \gamma_3 \tau f s}{L}}. \quad (14)$$

Исходя из этих формул, установим искомые соотношения.

1. 1. Первые оптимальные соотношения

Условия минимума $m. d. c.$ при заданных p и Q уже получены в работе [3] и определяются формулой (1), откуда следует, что оптимальное скольжение s_1 равно:

$$s_1 = \frac{1}{1 + \frac{b}{\Delta}}. \quad (15)$$

Это оптимальное скольжение можно также получить из (12), если Δ выразить через постоянные величины и скольжение s и затем производную $\frac{\partial I_{m1}}{\partial s}$ приравнять нулю. Таким образом, мы получаем $I_{m1, min}$ при переменных s и b и постоянных остальных геометрических размерах. Здесь можно отметить, что абсолютный минимум I_{m1} равен нулю, т. к. с увеличением τ I_{m1} монотонно убывает:

$$\lim_{\tau \rightarrow \infty} I_{m\mu} = 0.$$

Уменьшение $I_{m\mu}$ происходит также и с ростом a , причем

$$\lim_{a \rightarrow \infty} I_{m\mu} = \frac{2\pi \Delta}{\mu_0 \tau^2} \sqrt{\frac{p}{n \gamma_3 f}}.$$

Если выражению (15) придать вид:

$$S_1 = \frac{1}{1 + \frac{2}{1 + \frac{l+d}{b}}},$$

то легко можно заметить, что оптимальное скольжение зависит от отношения $\frac{l+d}{b}$. При неизменном размере $l+d$ с уменьшением b оптимальное скольжение увеличивается. Пределы изменения s_1 :

$$\frac{1}{3} < s_1 < 1,$$

причем к меньшему пределу скольжение стремится, если $b \gg l+d$ или когда $l+d=0$, а к большему пределу — при $b \ll l+d$.

Если считать Q , f , l и d заданными, то в выражении (1) три величины: b , a и τ подлежат определению. Очевидно, что двум из них могут быть даны произвольные значения, вследствие чего мы можем иметь бесчисленное множество решений.

Для получения более конкретных результатов необходимы дополнительные уравнения, связывающие определяемые величины, которые должны вытекать из дополнительных условий.

Одним из возможных дополнительных условий при наличии условия (15) может являться требование минимального линейного тока в обмотках индуктора.

Определим условие минимального линейного тока в индукторе исходя из выражения (9), причем переменной величиной будем считать τ , а все остальные величины — постоянными. Это же условие можно сформулировать как условие максимальной индукции в зазоре при заданном линейном токе индукторов.

Постоянство размера b при изменении τ можно обеспечить, если положить произведение

$$a\tau = \frac{Q}{4fb} \left(3 + \frac{l+d}{b} \right) = const, \quad (16)$$

что следует из (1). Так как число полюсных делений n также предполагается постоянным, то условие (16) есть требование постоянства площади рабочей поверхности индукторов. Поэтому, изменяя τ , чтобы сохранить площадь поверхности индуктора неизменной, мы должны одновременно изменять и ширину индуктора a .

Приравнивая производную $\frac{\partial I_{m1}}{\partial \tau}$ нулю, найдем:

$$\tau_1 = \sqrt{\frac{\pi \Delta}{\mu_0 f \left(\gamma_2 d + \gamma_3 b \frac{\Delta}{b + \Delta} \right)}}$$

или, используя (15):

$$\tau_1 = \sqrt{\frac{\pi s_1 (l + d)}{\mu_0 f [\gamma_2 d (3s_1 - 1) + \gamma_3 (l + d)(1 - s_1)s_1]}}$$

Последнее выражение показывает, что оптимальное полюсное деление τ_1 является функцией скольжения, а максимум этой функции имеет место при

$$s_{1\tau} = \sqrt{\frac{\gamma_2 d}{\gamma_3 (l + d)}}. \quad (17)$$

Из (10) можно убедиться, что условие (17) является одновременно и условием максимального $\cos \varphi$, если считать b — переменной.

Так как $1 > s_1 > \frac{1}{3}$, то необходимым условием существования τ_{1max} и $\cos \varphi_{max}$ является:

$$1 > \frac{\gamma_2 d}{\gamma_3 (l + d)} > \frac{1}{9}.$$

В противном случае максимума τ_1 и $\cos \varphi$ не существует.

Если

$$\frac{\gamma_2 d}{\gamma_3 (l + d)} < \frac{1}{9},$$

то τ_1 и $\cos \varphi$ монотонно уменьшаются с ростом b_1 (или с уменьшением скольжения s_1).

Если же $\frac{\gamma_2 d}{\gamma_3 (l + d)} > 1$, то τ_1 и $\cos \varphi$ монотонно возрастают с ростом b_1 (или с уменьшением s_1).

При $\tau = \tau_1$ $\cos \varphi$ не зависит от выбора b_1 или s_1 и является постоянной величиной, равной

$$\cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{2}} \approx 0,707,$$

а это означает, что при любых b_1 всегда:

$$I_{m1} = I_{m2} + I_{m3}.$$

Условие (17) с конструктивной точки зрения есть условие минимальной площади поперечного сечения горловины. Это видно из выражения (1), если правую и левую его части умножить на Q .

В качестве дополнительного условия может быть поставлено также требование максимума к. п. д. насоса при соблюдении основного условия (15). Для нахождения соотношений при таком дополнительном требовании выразим все потери через заданные величины p и Q .

Решив уравнение (1) относительно $a\tau$, получим:

$$a\tau = \frac{Q(3b + l + d)}{4fb^2}.$$

Учитывая эту зависимость, а также то, что:

$$R = R'L = R'n\tau,$$

для выражений (11), (5), (6) и (7) будем иметь:

$$P_1 = \frac{2pR'(b + \Delta)}{\gamma_3 \tau f \Delta} \left[\left(\frac{\pi \Delta}{\mu_0 \tau} \right)^2 + (\tau f)^2 \left(\gamma_2 d + \frac{\gamma_3 b \Delta}{b + \Delta} \right)^2 \right];$$

$$P_2 = \frac{pQ \gamma_2 d (b + \Delta)^2}{\gamma_3 b^2 \Delta};$$

$$P_3 = \frac{pQ \Delta}{b};$$

$$P_4 = 2Q\tau \sqrt{\frac{2\pi p \nu \rho f}{\Delta (b + \Delta)}}.$$

Если $\tau = \tau_1$, то:

$$P_1 = \frac{4pR'}{\gamma_3} [\gamma_2 d (b + \Delta) + \gamma_3 b \Delta] \sqrt{\frac{\pi f [\gamma_2 d (b + \Delta) + \gamma_3 b \Delta]}{\mu_0 \Delta (b + \Delta)}};$$

$$P_4 = 2Q \sqrt{\frac{2\pi p \nu \rho}{\mu_0 [\gamma_2 d (b + \Delta) + \gamma_3 b \Delta]}}.$$

P_2 и P_3 от τ не зависят.

Полученные выражения для мощностей потерь позволяют найти условие максимума к. п. д. Так как аналитически такое решение получить трудно, то при конкретных данных, пожалуй, проще всего построить график $\eta = \eta'(b_1)$, на основе которого и определить оптимальный размер, обеспечивающий максимум к. п. д.

Формула для к. п. д. зависит от назначения насоса. Для гидравлического к. п. д. [3]:

$$\eta = \frac{pQ - P_4}{pQ + P_1 + P_2 + P_3}. \quad (18)$$

В ряде конструкций возможно горловину выполнить из непроводящего материала (керамики, стекла, пластмассы, резины и т. п.).

Иногда горловина может образовываться самими индукторами, поверхность которых покрыта какой-либо тонкой пленкой.

Во всех этих частных случаях полученные выражения значительно упрощаются. В частности, если тепловая изоляция и горловина отсутствуют, т. е. если

$$l + d = 0$$

или

$$l + d \ll b,$$

то оптимальное скольжение и полюсное деление не зависят от b_1 и равны:

$$s_{01} = \frac{1}{3},$$

$$\tau_{01} = \sqrt{\frac{3\pi}{2\mu_0 f \gamma_3}}.$$

При $\tau = \tau_{01}$:

$$\cos \varphi \approx 0,707.$$

Площадь поперечного сечения горловины

$$ab = \frac{3Q}{4\tau f}.$$

При $\tau = \tau_{01}$

$$ab = \frac{Q}{4} \sqrt{\frac{6\mu_0 \gamma_3}{\pi f}}.$$

Оптимальный размер b_1 , при котором имеет место η_{max} , получится при решении кубического уравнения вида:

$$b_1^3 - Ab^2 - B = 0,$$

где

$$A = 2\tau \sqrt{\frac{6nf\nu\rho}{p}},$$

$$B = \frac{Q}{R'} \sqrt{\frac{\pi f \nu \rho}{6p}} \frac{\gamma_3 f}{\left(\frac{\pi}{2\mu_0 \tau^2}\right)^2 + \left(\frac{\gamma_3 f}{3}\right)^2}.$$

При выводе последнего уравнения сопротивление обмоток индукторов R было принято постоянным, не зависящим от величины b .

1. 2. Вторые оптимальные соотношения

Суммарный ток в жидком металле и стенках горловины (после некоторых преобразований):

$$I_{m2} + I_{m3} = 2 \sqrt{\frac{\rho f}{n}} \left(\frac{\gamma_2 d}{\sqrt{\gamma_3 s}} + b \sqrt{\gamma_3 s} \right).$$

Приравнявая производную $\frac{\partial (I_{m2} + I_{m3})}{\partial s}$ нулю, получим:

$$s_2 = \frac{\gamma_2 d}{\gamma_3 b}. \quad (19)$$

Оптимальная площадь поперечного сечения:

$$ab = \frac{Q}{2\tau f \left(1 - \frac{\gamma_2 d}{\gamma_3 b} \right)}.$$

Оптимальный зазор:

$$b_2 = \frac{Q}{2\tau f a} - \frac{\gamma_2 d}{\gamma_3}.$$

Общий ток в горловине при оптимальном скольжении:

$$I_{m2} + I_{m3} = 4\tau \sqrt{npf_1 \gamma_2 db}.$$

Из (19) следует, что минимум общего тока в горловине может иметь место, если выполнено условие:

$$b > \frac{\gamma_2}{\gamma_3} d.$$

Аналогично предыдущему случаю поставим дополнительные требования минимума линейного тока индукторов при наличии условия (19).

Линейный ток индукторов:

$$I_{m1} = 2B_m \sqrt{\left(\frac{\pi \Delta}{\mu_0 \tau} \right)^2 + (2\tau f \gamma_2 d)^2}.$$

Минимум линейного тока индукторов при изменении полюсного деления τ наступит при

$$\tau_2 = \sqrt{\frac{\pi \Delta}{2\mu_0 f \gamma_2 d}}.$$

Если $\tau = \tau_2$, то

$$\cos \varphi_2 = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

при любом s_2 .

Уменьшение размера b приводит к уменьшению полюсного деления τ , общего тока в горловине $I_{m2} + I_{m3}$ и общего линейного тока индукторов I_{m3} . В то же время площадь поперечного сечения горловины и требуемый ее объем увеличиваются. Когда размер b достигает величины

$$b = \frac{1}{2}(l+d) \left\{ -1 + 3 \frac{\gamma_2 d}{\gamma_3 (l+d)} + \sqrt{\left[1 - 3 \frac{\gamma_2 d}{\gamma_3 (l+d)} \right]^2 + 4 \frac{\gamma_2 d}{\gamma_3 (l+d)}} \right\}, \quad (20)$$

то условия (15) и (19) совпадают:

$$s_1 = s_2.$$

Вместо требования минимума линейного тока индукторов может быть поставлено требование максимума к. п. д. насоса, если основное условие (19) остается прежним.

Размер b , при котором имеет место максимальный к. п. д., получается из формулы (18), причем отдельные слагаемые, входящие в эту формулу, имеют следующие значения:

$$P_1 = \frac{2pRb}{n\tau^2 f \gamma_2 d} \left[\left(\frac{\pi \Delta}{\mu_0 \tau} \right)^2 + (2\tau f \gamma_2 d)^2 \right];$$

$$P_2 = \frac{pQ}{1 - \frac{\gamma_2 d}{\gamma_3 b}};$$

$$P_3 = \frac{pQ}{\frac{\gamma_3 b}{\gamma_2 d} - 1};$$

$$P_4 = 2\tau Q \sqrt{\frac{2np\sqrt{p}f\gamma_3}{b\gamma_2 d}} \left(1 - \frac{\gamma_2 d}{\gamma_3 b} \right).$$

В случае, когда $\tau = \tau_2$

$$P_1 = \frac{16}{n} p R f \gamma_2 d b;$$

$$P_4 = \frac{2Q}{b} \left(\frac{\gamma_3 b}{\gamma_2 d} - 1 \right) \sqrt{\frac{\pi p \nu \rho \Delta}{\mu_0 \gamma_3 b}}.$$

1. 3. Третьи оптимальные соотношения

Общий линейный ток индукторов

$$I_{m1} = 2 \sqrt{\frac{p}{n \tau^2 f \gamma_3 s} \left[\left(\frac{\pi \Delta}{\mu_0 \tau} \right)^2 + (\tau f)^2 (\gamma_2 d + \gamma_3 b s)^2 \right]}.$$

Найдем минимум тока I_{m1} при переменном скольжении и постоянных остальных величинах. Приравнявая производную $\frac{\partial I_{m1}}{\partial s}$ нулю, получим:

$$\dot{s}_3 = \frac{1}{\gamma_3 b} \sqrt{\left(\frac{\pi \Delta}{\mu_0 \tau^2 f} \right)^2 + (\gamma_2 d)^2}. \quad (21)$$

Аналогичный результат ранее уже был получен Д. А. Ваттом [2].

В качестве дополнительного условия поставим требование минимальной площади поверхности индукторов.

Площадь поверхности индуктора равна:

$$n \tau a = \frac{nQ}{2fb(1-s)}.$$

Используя (21), получим:

$$n \tau a = \frac{nQ}{2f \left[b - \frac{1}{\gamma_3} \sqrt{\left(\frac{\pi \Delta}{\mu_0 \tau^2 f} \right)^2 + (\gamma_2 d)^2} \right]}.$$

Считая b переменной, найдем минимум функции $n \tau a = f'(b)$:

$$b_{03} = \frac{(l+d)(1-MK^2)}{2(K-1)}, \quad (22)$$

где

$$K = \left(\frac{2\mu_0 \tau^2 f \gamma_3}{\pi} \right)^2, \quad a M = \left[\frac{\gamma_2 d}{\gamma_3 (l+d)} \right]^2.$$

Необходимое условие существования минимума, когда $\gamma_2 < \gamma_3$:

$$\frac{\pi}{2\mu_0 f \gamma_3} \sqrt{\frac{\gamma_3 (l+d)}{\gamma_2 d}} > \tau^2 > \frac{\pi}{2\mu_0 f \gamma_3},$$

или, в случае, если $\gamma_2 > \gamma_3$:

$$\frac{\pi}{2\mu_0 f \gamma_3} \sqrt{\frac{\gamma_3(l+d)}{\gamma_2 d}} < \tau^2 < \frac{\pi}{2\mu_0 f \gamma_3}.$$

Решая (22) относительно τ , будем иметь:

$$\tau = \sqrt{\frac{\pi}{2\mu_0 f \gamma_3}} \sqrt[4]{\sqrt{N^2 + N\left(2 + \frac{l+d}{b}\right)} - N},$$

причем

$$N = \frac{\gamma_3^2 b(l+d)}{\gamma_2^2 d^2}.$$

Условие максимума к. п. д. при условии (21), пожалуй, проще всего, можно найти аналогично предыдущим случаям, выражая необходимые величины через s_3 ; затем, используя (18), можно построить график функции $\eta = f(b)$, если будут известны конкретные условия.

1. 4. Четвертые оптимальные соотношения

Для любого насоса:

$$\frac{Q}{ab} = 2f\tau(1-s). \quad (23)$$

Используя (23), получим следующие выражения для (11), (5), (6) и (7):

$$P_1 = \frac{2pR}{L\gamma_3\tau fs} \left[\left(\frac{\pi \Delta}{\mu_0 \tau} \right)^2 + (\tau f)^2 (\gamma_2 d + \gamma_3 b s)^2 \right]; \quad (11a)$$

$$P_2 = \frac{pQ\gamma_2 d}{\gamma_3 b s (1-s)}; \quad (5-a)$$

$$P_3 = \frac{pQs}{1-s}; \quad (6-a)$$

$$P_4 = \frac{2Q\tau(1-s)}{b} \sqrt{\frac{2Lp\gamma_2 f}{\tau s}}. \quad (7-a)$$

Нахождение максимума к. п. д. в зависимости от скольжения или других величин в общем случае представляет довольно трудную задачу, приводящую к громоздким выражениям.

Очевидно, и в этом случае необходимо прибегнуть к построению графиков, из которых уже нетрудно определить оптимальные условия.

Определим скольжения, при которых имеет место минимум потерь в отдельных элементах насоса, если p и Q — постоянные.

Исследуя влияние скольжения на потери, можно установить, что минимум потерь в стенках горловины насоса имеет место при

$$s = \frac{1}{2}; \quad (24)$$

минимум электрических потерь, определяемых суммой $P_2 + P_3$ — при

$$s = \sqrt{\left(\frac{\gamma_2 d}{\gamma_3 b}\right)^2 + \frac{\gamma_2 d}{\gamma_3 b} - \frac{\gamma_2 d}{\gamma_3 b}}. \quad (25)$$

Введем понятие к. п. д. горловины, под которым будем понимать выражение:

$$\eta = \frac{pQ}{pQ + \Sigma P'},$$

где $\Sigma P'$ — сумма потерь в горловине насоса:

$$\Sigma P' = P_2 + P_3 + P_4 + P_5.$$

P_5 — потери мощности в медных шинах (фиг. 2). Значения других величин указаны выше.

Пренебрегая гидравлическими потерями и потерями в медных шинах, получим условие максимума к. п. д. горловины, совпадающее с условием минимума потерь суммы ($P_2 + P_3$).

Соотношение (25) совпадает с соответствующим выражением для s в работе Ватта [2].

При выводе условий (24) и (25) переменной величиной является скольжение s . Из (23) видно, что постоянство всех остальных величин можно обеспечить, если одновременно с изменением s будет изменяться и ширина горловины a таким образом, чтобы (23) всегда удовлетворялось. Следовательно, полученные условия минимума потерь (24) и (25) будут справедливыми при переменных s и a .

Вместо ширины горловины a мы можем сделать переменной производительность насоса Q . Тогда оптимальные условия изменяются. Минимум электрических потерь $P_2 + P_3$ теперь будет при скольжении, равном

$$s = \sqrt{\frac{\gamma_2 d}{\gamma_3 b}}. \quad (26)$$

Минимум потерь в обмотках индуктора — при

$$s = \sqrt{\left(\frac{\pi \Delta}{\mu_0 \tau^2 f \gamma_3 b}\right)^2 + \left(\frac{\gamma_2 d}{\gamma_3 b}\right)^2}. \quad (27)$$

Последние из полученных соотношений используются ниже при упрощенном расчете насосов на максимум к. п. д.

§ 2. Расчет параметров и режима работы индукционного насоса на максимум к. п. д.

2. 1. Вывод дополнительных формул

Как видно из предыдущего текста, расчет насосов исходя из первых трех оптимальных соотношений в сильной мере зависит от конкретных требований, предъявляемых к проектируемой установке и, очевидно, не будет содержать в себе принципиальных затруднений, тем более, что многие стороны этих расчетов показаны в работах [1] и [2].

Для насосов непрерывного действия, работающих в теплоотводящих системах, основным требованием обычно будет являться их экономичность.

Как уже отмечено выше, расчет на максимальный к. п. д. в общем случае представляет собой сложную задачу. Однако на основе четвертых оптимальных соотношений можно получить приближенные решения, вполне приемлемые для целей практики.

Как показывает опыт, в индукционных насосах наибольшие потери имеют место в нагнетаемой жидкости и в стенках горловины. Поэтому для повышения к. п. д. установки необходимо в первую очередь добиться уменьшения этих потерь. Это требование осуществляется путем зыбора скольжения согласно (26).

Следующие по величине потери есть электрические потери в обмотках индуктора. Поставим себе целью получить минимум этих потерь при выполнении условия (26). Из сравнения (26) и (27) следует, что минимум потерь в обмотках индукторов будет совпадать с минимумом потерь в нагнетаемой жидкости и стенках горловины, если полюсное деление τ будет равно:

$$\tau = \sqrt{\frac{\pi \Delta}{\mu_0 f \gamma_3 b \sqrt{\frac{\gamma_2 d}{\gamma_3 b} - \left(\frac{\gamma_2 d}{\gamma_3 b}\right)^2}}}. \quad (28)$$

Выбрав скольжение s и полюсное деление τ соответственно на основе (26) и (28), мы тем самым устанавливаем условия

минимальных потерь, которые, очевидно, будут близки к условиям максимального к. п. д. Гидравлические потери и потери в стали обычно составляют небольшую часть общих потерь. Это позволяет не учитывать их при выборе основных параметров.

Выражения (26) и (28) являются функциями размера b , которым мы можем произвольно задаваться.

Таким образом, для любого размера b мы имеем возможность установить оптимальные s и τ и, следовательно, все остальные параметры и режим работы насоса, исходя из заданных производительности и давления и свойств нагнетаемой жидкости.

Задаваясь несколькими различными величинами b , можно установить размер b , дающий максимальный к. п. д. В ряде конкретных случаев этот максимальный к. п. д. может иметь место при нежелательных и недопустимых конструктивных параметрах или недопустимых режимах работы, вследствие чего он практически будет недостижим, но такой расчет покажет направление, идя по которому в пределах практических возможностей, мы получим наиболее рациональную конструкцию.

Чтобы избежать излишних расчетов, приводящих к непригодным для практики вариантам, следует ориентировочно выбрать значение b , исходя из заданной производительности и допустимой скорости течения жидкого металла в горловине.

Скорость жидкого металла равна:

$$u_M = \frac{Q}{ab}. \quad (29)$$

Обозначив отношение ширины горловины к ее высоте через k :

$$k = \frac{a}{b},$$

из (29) получим:

$$b = \sqrt{\frac{Q}{ku_M}}. \quad (30)$$

Допустимые значения k и u_M определяются из опыта или из проектного задания, если эти величины в задании специально оговариваются.

На основании работы [1] из других источников можно установить, что практически

$$b = \left(\frac{1}{7} \div \frac{1}{20}\right) \sqrt{Q}.$$

Этим соотношением и следует руководствоваться при выборе величины b .

При определении скольжения по формуле (26) надо учитывать приближенный характер этой формулы, т. к. при ее выводе принимались во внимание лишь потери, создаваемые бегущим полем в двух элементах конструкции: в стенках горловины и в жидком металле. Пренебрежение потерями, имеющими место в других элементах конструкции, естественно, может привести к неточному определению s . В формуле (26) пренебрегается также поперечным и продольным эффектами.

В более общем виде формулу (26) можно было бы написать в виде

$$s = \sqrt{\frac{\gamma_2 x b}{\gamma_3 d}},$$

где все факторы, влияющие на скольжение, учитываются путем введения множителя x перед толщиной стенок горловины d . Однако, значение x остается неизвестным.

В настоящее время, когда отсутствуют достаточные экспериментальные данные, в процессе расчета при варьировании b необходимо задаваться также и несколькими значениями s , отличными от значений, получаемых по формуле (26), и из ряда вариантов отобрать наилучший.

Для всех индукционных насосов, построенных в Институте физики АН Латв. ССР, рабочие скольжения были довольно близки к значениям, даваемым формулой (15). Поэтому в качестве одного из ориентировочных значений можно рекомендовать определение s по формуле (15). Подставив значение s , полученное на основании (15), в формулу (16), найдем примерную величину x . Множитель x перед размером d должен быть поставлен также и в формулу (28).

В конструкции, показанной на фиг. 1, между стенкой горловины и медными шинами возможен контакт. Наличие контакта устраняет поперечный эффект. Поперечный эффект будет отсутствовать также и в насосах коаксиального типа. Эти два случая позволяют использовать формулы в том виде, в котором они выведены в настоящей статье.

Можно отметить, что контакт между горловиной и шинами ухудшает экономичность работы насоса за счет увеличения потерь в стенках горловины и в обмотках индукторов, но допущение такого контакта позволяет упростить технологию сборки насоса.

При расчете токов и мощностей потерь в плоских насосах, когда стенки горловины или жидкость не имеют контакта с медными шинами (или, вообще, когда медные шины отсутствуют), становится необходимым учитывать поперечные эффекты. Учет как поперечных, так и продольных эффектов осуществляется путем введения в формулы соответствующих коэффициентов, значения которых приводятся в работе [1].

На основе сказанного предлагается следующая методика расчета основных параметров и режимов работы электромагнитных насосов индукционного типа в практической системе единиц, если заданными являются величины:

1. давление, развиваемое насосом — $p \left(\frac{\text{Н}}{\text{М}^2} \right)$;
2. производительность насоса — Q (м³/сек);
3. параметры нагнетаемого металла (электропроводность, вязкость, рабочая температура и т. п.).

2. 2. Порядок расчета

На основе рабочей температуры, физических и химических свойств нагнетаемого металла выбираем материал горловины. Устанавливаем минимально допустимую толщину выбранного материала $\frac{d}{2}$, при которой обеспечивается достаточная механическая прочность и надежность работы насоса.

Устанавливаем также минимально возможную толщину теплоизоляционного слоя в зазоре l (если такая изоляция требуется).

1. Исходя из формулы:

$$b \approx \left(\frac{1}{7} \div \frac{1}{20} \right) \sqrt{Q}, \quad (30)$$

задаемся некоторым значением внутренней высоты горловины b .

2. Определяем величину полюсного деления τ по формуле:

$$\tau = \sqrt{\frac{\pi \Delta}{\mu_0 f \gamma_3 b \sqrt{\frac{\gamma_2 d}{\gamma_3 b} - \left(\frac{\gamma_2 d}{\gamma_3 b} \right)^2}}} \quad (28)$$

3. Находим скольжение

$$s = \sqrt{\frac{\gamma_2 d}{\gamma_3 b}} \quad (26)$$

4. Находим намагничивающую составляющую тока индукторов:

$$I_{m1} = \frac{2 \pi \Delta}{\mu_0 \tau^2} \sqrt{\frac{p}{n f \gamma_3 s}} \quad (12)$$

Числом полюсных делений n задаемся исходя из конкретных условий проекта. В зависимости от типа обмотки оно мо-

жет быть как четным (однослойная обмотка), так и нечетным (двухслойная обмотка). При двухслойной обмотке минимальная величина n равна

$$n_{min} = 5$$

Увеличение n приводит к увеличению длины насоса L и вместе с тем, к уменьшению линейных токов в индукторах и уменьшению роли продольных краевых эффектов, не учитываемых в настоящем расчете.

5. Находим активные составляющие линейного тока и линейный ток:

$$I_{m2} = \frac{2\gamma_3 d \sqrt{P f}}{\sqrt{n \gamma_3 s}}; \quad (13)$$

$$I_{m3} = 2b \sqrt{\frac{p \gamma_3 f s}{n}}; \quad (14)$$

$$I_{m1} = \sqrt{I_{m2}^2 + (I_{m2} + I_{m3})^2}. \quad (9)$$

6. Находим эквивалентную высоту меди в индукторах h (толщину медного слоя, если бы всю медь обмоток равномерно распределить по поверхности индуктора) по формуле:

$$h = \frac{I_{m1}}{\delta_{m1max}},$$

где δ_{m1max} — максимально допустимая амплитуда плотности тока в обмотках индуктора.

7. Находим ширину индукторов:

$$a = \frac{Q}{2zf(1-s)b}. \quad (23)$$

8. Находим эквивалентное сопротивление обмоток на единицу длины индуктора:

$$R' = \frac{l'}{h\gamma_1},$$

причем γ_1 — удельная электропроводность материала обмоток индуктора.

l' — половина периметра секции обмоток. Часто применяют $l' = a + 1,5\tau$ (a — длина паза в индукторе).

9. Определяем мощность потерь в обмотках индукторов:

$$P_1 = \frac{1}{2} I_{m1}^2 R' n\tau.$$

10. Находим мощность электрических потерь в стенках горловины:

$$P_2 = \rho Q \frac{\gamma_2 d}{\gamma_3 b} \frac{1}{s(1-s)}. \quad (5-a)$$

11. Находим мощность электрических потерь в жидком металле:

$$P_3 = \rho Q \frac{s}{1-s}. \quad (6-a)$$

12. Находим мощность гидродинамических потерь в жидком металле:

$$P_4 = \frac{2Q\tau \sqrt{2n\pi f \nu \rho (1-s)}}{b \sqrt{s}}. \quad (7-a)$$

При турбулентном течении потери рассчитываются по обычным формулам гидродинамики.

13. Определяем к. п. д. установки:

$$\eta = \frac{\rho Q - P_4}{\rho Q + P_1 + P_2 + P_3}. \quad (18)$$

14. Выбираем некоторое другое значение b , близкое к первому, и повторяем расчет. В зависимости от результатов задаемся еще несколькими значениями b и s , после чего выбираем оптимальный вариант.

Расчеты удобно сводить в таблицы, где возможно значительно рационализировать необходимые вычисления.

Следует отметить, что в настоящее время наибольшее распространение получила двухслойная обмотка, впервые приме-

ненная П. А. Фридкиным для двигателей с дуговым статором и давшая лучшие результаты по сравнению с однослойной обмоткой.

Двухслойная обмотка приводит к необходимости иметь на конце статора зоны (по длине равные полюсному делению) в которых пазы лишь наполовину заполнены обмоткой.

Неравномерность обмотки может быть учтена введением в формулы поправочного коэффициента.

Ниже приведены результаты расчета электромагнитных насосов по предлагаемому методу.

2. 3. Примеры расчетов.

С целью сокращения расчетов было внесено следующее упрощение. В практических конструкциях насоса обычно

$$I_{m1} \approx I_{m2} + I_{m3}.$$

Чтобы не отклоняться значительно от этого соотношения, было принято, что

$$I_{m1} = I_{m2} + I_{m3}.$$

Из (12), (13), (14) и (26) нетрудно установить полюсное деление τ , при котором обеспечивается равенство этих составляющих линейного тока индукторов:

$$\tau = \sqrt{\frac{\pi \Delta}{\mu_0 f \gamma_3 b \left(\frac{\gamma_2 d}{\gamma_3 b} + \sqrt{\frac{\gamma_2 d}{\gamma_3 b}} \right)}}.$$

Получающиеся значения τ отличаются от значений, получаемых по формуле (28), однако, расхождение невелико, и общий характер изменения всех величин остается прежним.

Значение x было принято равным единице.

Расчет производился для двух жидких металлов — натрия и ртути. Первый металл обладает высокой электропроводностью, а второй — очень малой электропроводностью. Поэтому все металлы и сплавы, предложенные в настоящее время для использования в качестве теплоотводящих жидкостей, по электропроводности будут занимать промежуточное положение между этими двумя металлами.

В расчетах было принято:

$$\gamma_{3Na} = 10 \cdot 10^6 \frac{1}{\text{ОМ} \cdot \text{М}} \quad n=5$$

$$\nu_{\rho Na} = 3 \cdot 10^{-1} \frac{\text{Н} \cdot \text{сек}}{\text{М}^2} \quad \bar{f} = 50 \text{ гц}$$

$$\gamma_{3Hg} = 10^6 \frac{1}{\text{ОМ} \cdot \text{М}} \quad \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{гН}}{\text{М}}$$

$$\nu_{\rho Hg} = 15 \cdot 10^{-1} \frac{\text{Н} \cdot \text{сек}}{\text{М}^2} \quad \gamma_{1Cu} = 57 \cdot 10^6 \frac{1}{\text{ОМ} \cdot \text{М}}$$

$$d=l=0,002 \text{ м} \quad \delta_{m1max} = 3 \frac{a}{\text{ММ}^2}$$

$$\gamma_2 = 10^6 \frac{1}{\text{ОМ} \cdot \text{М}}$$

Как для натрия, так и для ртути расчеты произведены при нескольких различных p и Q .

Гидродинамические потери во всех случаях определялись по формуле, справедливой для ламинарного течения, причем потери в диффузорах и других подобных элементах, которые могут быть отнесены к насосу, не учитывались.

В таблице приводятся также и нереальные варианты с целью показать характер изменения отдельных величин на протяжении большего диапазона изменения b .

2. 3. Таблицы результатов расчетов параметров и режима работы индукционных насосов.

А. НАГНЕТАЕМАЯ ЖИДКОСТЬ — НАТРИЙ.

Таблица 1.

№ варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<i>b</i> метров	0,001	0,003	0,004	0,005	0,01	0,02	0,04	0,06	0,08
τ метров	0,14	0,13	0,14	0,14	0,15	0,17	0,19	0,21	0,22
<i>s</i>	0,45	0,26	0,22	0,20	0,14	0,10	0,07	0,06	0,05

Таблица 2.

$P_{\text{м.на}}$	Q	N	№ ва- рианта	$I_{m2} \cdot 10^{-3}$	$I_{m3} \cdot 10^{-3}$	$I_{m1} \cdot 10^{-3}$	a	P_1	$P_2=P_3$	P_4	$B^*)$	$i_{\text{м}}$	η	
				a/m	a/m	a/m								квт
10^6	0,001	1	1	1,9	4,2	8,6	0,130	0,05	0,08	0,03	0,48	7,7	0,23	
			2	2,5	9,6	17,1	0,033	0,07	0,04	0,02	0,66	10,0	0,35	
			3	2,7	11,9	20,7	0,024	0,08	0,03	0,01	0,70	10,5	0,36	
			4	2,8	14,2	24,0	0,018	0,10	0,02	0,01	0,73	10,9	0,36	
			5	3,4	23,8	38,4	0,008	0,17	0,02	0,01	0,81	12,7	0,31	
	0,1	4	4	2,8	14,2	24,0	1,83	0,87	2,50	1,20	0,73	10,9	0,56	
			5	3,4	23,8	38,4	0,79	0,75	1,65	0,82	0,81	12,7	0,65	
			6	4,0	40,0	62,2	0,34	0,78	1,11	0,58	0,86	13,5	0,72	
			7	4,8	67,3	102	0,14	1,09	0,76	0,41	0,88	17,9	0,76	
			8	5,3	90,7	136	0,08	1,48	0,62	0,34	0,93	19,7	0,76	
	10 ⁶	0,001	1	1	6,0	13,3	27	0,130	0,17	0,81	0,09	0,15	7,7	0,33
				2	7,8	30,4	54	0,033	0,22	0,35	0,05	0,21	10,0	0,50
				3	8,4	37,8	66	0,024	0,26	0,29	0,04	0,22	10,5	0,52
				4	9,0	45,0	76	0,018	0,30	0,25	0,04	0,23	10,9	0,53
				5	10,6	75,2	121	0,008	0,53	0,16	0,03	0,26	12,6	0,52
0,1		4	4	9,0	45,0	76	1,83	2,74	25	3,8	0,23	10,9	0,63	
			5	10,6	75,2	121	0,79	2,37	16	2,6	0,26	12,7	0,72	
			6	12,6	126	196	0,34	2,48	11	1,8	0,27	13,5	0,79	
			7	15,1	212	322	0,14	3,43	7,6	1,3	0,28	17,9	0,83	
0,1	8	8	16,7	287	430	0,08	4,68	6,2	1,1	0,29	19,7	0,84		
		9	17,9	358	530	0,06	6,14	5,3	0,9	0,28	21,2	0,85		

* В — действующее значение индукции в зазоре между индукторами.

Б. НАГНЕТАЕМАЯ ЖИДКОСТЬ — РТУТЬ.

Таблица 3.

№ варианта	1	2	3	4	5	6	7	8
<i>b</i> метров	0,003	0,004	0,005	0,01	0,02	0,04	0,06	0,08
τ метров	0,20	0,20	0,21	0,23	0,27	0,32	0,35	0,38
<i>s</i>	0,82	0,71	0,63	0,45	0,32	0,22	0,18	0,16

Таблица 4.

P к/м ²	Q м ³ /сек	№ ва- рианта	$I_{m2} \cdot 10^{-3}$	$I_{m3} \cdot 10^{-3}$	$I_{m1} \cdot 10^{-3}$	<i>a</i> м	P_1 квт	$P_2=P_3$ квт	P_4 квт	B^* вб/м ²	U_m м/сек	η	
			<i>a</i> /м	<i>a</i> /м	<i>a</i> /м								
10 ⁵	0,001	1	4,4	5,4	13,9	0,092	0,14	0,45	0,007	0,08	3,6	0,08	
		2	4,8	6,7	16,2	0,042	0,15	0,24	0,010	0,08	5,9	0,12	
		3	5,0	8,0	18,4	0,026	0,17	0,17	0,011	0,09	7,7	0,14	
		4	6,0	13,4	27,4	0,008	0,30	0,08	0,011	0,09	12,8	0,16	
		5	7,1	22,5	41,8	0,003	0,60	0,05	0,009	0,09	18,3	0,12	
	0,1	3	5,0	8,0	18,4	2,61	1,46	17,20	1,06	0,09	7,7	0,19	
		4	6,0	13,4	27,4	0,78	0,94	8,10	1,05	0,09	12,8	0,33	
		5	7,1	22,5	41,8	0,27	0,99	4,63	0,89	0,09	18,3	0,45	
		6	8,4	37,8	65,5	0,10	1,57	2,88	0,71	0,09	24,6	0,54	
		7	9,4	51,1	85,7	0,06	2,31	2,21	0,62	0,09	28,8	0,56	
		8	10,1	63,6	104	0,04	3,13	1,88	0,55	0,09	31,8	0,54	
	10 ⁶	0,001	1	14,0	17,1	44	0,092	0,45	4,46	0,023	0,25	3,6	0,10
			2	15,0	21,2	51	0,042	0,47	2,42	0,031	0,26	5,9	0,15
			3	15,9	25,1	58	0,026	0,54	1,72	0,033	0,27	7,6	0,19
			4	18,9	42,2	87	0,008	0,94	0,81	0,033	0,29	12,8	0,27
			5	22,4	71,0	132	0,003	1,88	0,46	0,028	0,30	18,3	0,26
0,1		3	15,9	25,1	58	2,61	4,6	17,2	3,3	0,27	7,6	0,22	
		4	18,9	42,2	87	0,78	3,0	8,1	3,3	0,29	12,8	0,36	
		5	22,4	71,0	132	0,27	3,1	4,6	2,8	0,30	18,3	0,50	
		6	26,7	119	207	0,10	5,0	2,9	2,2	0,30	25	0,60	
		7	29,6	162	271	0,06	7,3	2,2	2,0	0,30	28,8	0,64	
		8	32,0	201	329	0,04	9,9	1,9	1,7	0,30	32	0,67	

Выводы:

1. Утверждение о том, что наибольшие потери имеют место в горловине и нагнетаемом металле, верно, т. к. даже при специальном расчете на минимум этих потерь они все же превышают потери в обмотках индукторов. Лишь в насосах, нагнетающих жидкости с высокой электропроводностью при малых давлениях и малых производительностях, потери в обмотках начинают несколько превышать потери в горловине и жидкости, но они здесь могут быть легко снижены за счет увеличения меди в индукторах. Таким образом, подтверждается правильность предложенной методики расчета параметров насоса.

2. Для заданных p и Q существует зазор b , при котором к. п. д. максимален, однако в некоторых случаях осуществление полученного из расчета зазора b будет невозможно по конструктивным или другим соображениям (например, из-за чрезмерных скоростей жидкости и т. п.).

3. К. п. д. индукционного насоса зависит от электропроводности нагнетаемой жидкости, увеличиваясь с ростом последней. Поэтому с точки зрения максимального к. п. д. при выборе теплоохлаждающих жидкостей необходимо учитывать их электропроводность и стремиться выбирать жидкость по возможности с большей электропроводностью.

4. Чем больше требуемая полезная мощность (pQ), тем больший к. п. д. можно получить от насоса.

5. Потери давления в горловине насоса не зависят от производительности Q , но зависят от давления p , увеличиваясь с уменьшением p (при условиях задачи), при малых p эти потери могут составлять значительную величину. Учет потерь давления при малых p можно произвести путем соответствующего увеличения расчетного давления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Я. Я. Лиелпетер и И. А. Тютин. «Методика расчета индукционных насосов для жидкого металла». Труды Института физики АН Латв. ССР, вып. VIII, 1956 г. Прикладная магнитогидродинамика.

2. Watt D. A. «A Study in Design of Travelling Field Electromagnetic Pumps for Liquid Metals» AERE ED/R 1696.

3. И. А. Тютин и Э. К. Янкоп. «Электромагнитные процессы в индукционных насосах для жидкого металла». Труды Института физики АН Латв. ССР, вып. VIII, 1956. Прикладная магнитогидродинамика.

4. Murgatroyd W. «Experiments on Magneto-Hydrodynamical Channel Flow», Philosophical Magazine, 1953, 44 p. 1348.

Р. Д. ЮКНА, инженер

ЭКРАНИРОВАНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЗАЗЕМЛЕННОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИМ ЭКРАНОМ С ТОРЦЕВЫМ ИЛИ КОЛЬЦЕВЫМ ОТВЕРСТИЯМИ¹

В случаях, когда размеры экрана соизмеримы с длиной волны и если посредством элементов связи в нем наводятся эдс, сам экран становится эффективным излучателем электромагнитных волн — экзовибратором.

На практике для экранирования часто применяются заземленные экранирующие камеры. В случаях, когда заземляющий провод имеет длину порядка несколько метров, вся система (камера — заземляющий провод) может резонировать уже в диапазоне коротких волн.

При достаточно большой связи между источником помех и экраном мощность, излученная таким путем, может иметь значительную величину.

Для практических экранирующих камер, когда все условия нельзя учесть теоретическим расчетом, величину связи можно определить опытным путем (2).

Однако отдельные измерения не дают обобщающих выводов о том, как и через какие связи система экрана возбуждается. Поэтому теоретическое исследование этого вопроса представляет значительный практический интерес. В настоящей статье рассмотрены два частных случая работы экранированных излучателей.

Рассмотрим пример экранирования вертикального заземленного излучателя сплошным цилиндрическим, также заземленным экраном, имеющим или открытую торцевую поверхность или круговую щель, перпендикулярную к оси цилиндра.

Общая теория строгого расчета электродинамических систем экранов с отверстиями дана в работах Л. И. Мандельштама, М. С. Неймана, А. А. Пистолькорса, Я. Н. Фельда [1] и др. Од-

¹ Работа выполнялась под руководством *доктора техн. наук С. И. Зилитинкевича*.

нако применение общей теории точного расчета во многих случаях приводит к весьма громоздким математическим выкладкам.

Поэтому в известных конкретных случаях оправдывается применение приближенных методов, упрощающих расчеты.

Во-первых, будем считать что:

1) Экран имеет идеально проводящие и бесконечно тонкие стенки,

2) Излучатель с экраном находятся на идеально проводящей бесконечной плоской поверхности.

В случае идеально проводящего экрана волны через него не проходят и энергия излучается только через отверстия.

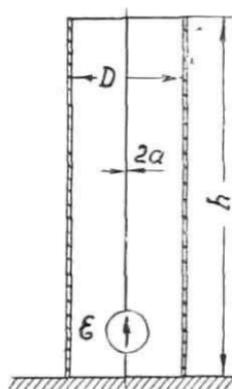
Токи на внешней поверхности экрана появляются как вторичный эффект, ибо должны удовлетворяться граничные условия на проводящей поверхности. Однако, так как существуют определенные соотношения между токами и полями, удобно в целях упрощения расчета и также для наглядности считать эти токи источником излучения.

Поэтому в дальнейшем под названием «энергия излученная через щель или отверстие» будем считать только ту энергию, которая излучается через щель или отверстие в случае, когда токи на внешней поверхности экрана не наводятся, т. е. только от токов на внутренней поверхности экрана.

Практически, пренебрегая краевым эффектом, это соответствует случаю, когда внешняя система экрана расстроена относительно рабочей частоты излучателя.

А. Цилиндрический экран с открытой торцевой поверхностью

Принимая, что диаметр цилиндрического экрана имеет малые размеры по сравнению с длиной волны, для решения за-



Фиг. 1.

дачи можно использовать понятие скалярного электрического потенциала и считать, что переменное электромагнитное поле в отверстии распределяется подобно электростатическому (фиг. 1).

Для определения поля, излученного через торцевое отверстие, воспользуемся уже имеющимся в литературе [3] решением для коаксиального кабеля, полученным применением метода эквивалентных поверхностных магнитных токов.

В соответствии с обозначениями на фиг. 2 эти решения в сферической системе координат будут иметь вид:

$$E_r = \frac{jmk}{4r_0^2} e^{-jmr_0} \cos\Theta \cdot (R^2 - a^2) \quad (1)$$

$$E_\Theta = -\frac{m^2k}{8r_0} e^{-jmr_0} \sin\Theta \cdot (R^2 - a^2). \quad (2)$$

$$H_\varphi = -\frac{\omega\varepsilon_0 mk}{8r_0} e^{-jmr_0} \sin\Theta \cdot (R^2 - a^2) = \frac{E_\Theta}{\rho_0}, \quad (3)$$

$$P = \frac{\pi^2 U_2^2}{360} \left[\frac{S}{\lambda^2 \ln \frac{R}{a}} \right]^2. \quad (4)$$

где: E_r — радиальная составляющая напряженности электрического поля;

E_Θ — составляющая напряженности электрического поля в направлении касательной к меридиальной окружности;

H_φ — напряженность магнитного поля в направлении касательной к параллельной окружности;

P — мощность, излученная через торцевое отверстие;

ω — угловая частота;

ε_0 — электрическая проницаемость вакуума в системе единиц МКСА;

U_2 — напряжение между верхним краем экрана и верхней точкой излучателя;

$$K = \frac{U^2}{\ln \frac{R}{a}}$$

a — радиус цилиндрического экрана;

R — радиус экранированной антенны;

r_0, θ, φ — сферические координаты точки наблюдения;

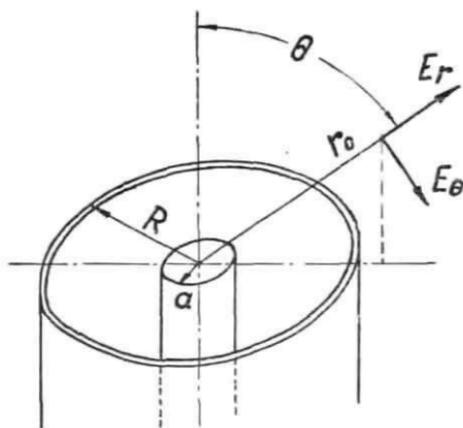
$m = \frac{2\pi}{\lambda}$ — пространственная частота;

$$j = \sqrt{-1},$$

$S = \pi(R^2 - a^2)$ — площадь отверстия;

λ — длина волны;

$\varphi_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}$ — волновое сопротивление вакуума.



Фиг. 2.

При выводе этих формул принято, что точка наблюдения находится достаточно далеко, что позволяет не учитывать разность расстояний между точкой наблюдения и различными элементами поверхности отверстия при определении абсолютных величин напряженностей.

Приведенное решение дано для бесконечно длинного экрана и не учитывает токи на поверхности экрана, т. к. не удовлетворяет граничному условию, что тангенциальная составляющая напряженности электрического поля на поверхности идеально проводящего экрана равна нулю. Следовательно, на поверхности экрана должны существовать токи, дающие тангенциаль-

ную составляющую напряженности электрического поля в противоположном направлении, так, чтобы удовлетворялось граничное условие.

Найдем излучение этих токов для случая, когда излучатель и экран расположены на идеально проводящей плоскости.

Для учета отраженной волны применим метод зеркального отражения (фиг. 3).

Составляющая напряженности электрического поля, направленная по образующей к поверхности цилиндра в точке P , равна:

$$E_t = E_{\Theta_1} \sin \Theta_1 + E_{\Theta_2} \cdot \sin \Theta_2 + E_{r_1} \cos \Theta_1 + E_{r_2} \cos \Theta_2, \quad (5)$$

где величины, относящиеся к реальной системе, обозначаются индексом «1», а к фиктивному отображению — индексом «2».

Подставляя в эту формулу выражения для E_{Θ_1} и E_{r_1} , а также аналогичные выражения для E_{Θ_2} и E_{r_2} , находим:

$$\begin{aligned} E_t = & -\frac{m^2 K}{8r_1} e^{-jmr_1} (R^2 - a^2) \sin^2 \Theta_1 - \\ & -\frac{m^2 K}{8r_2} e^{-jmr_2} (R^2 - a^2) \sin^2 \Theta_2 + \\ & + j \frac{mK}{4r_1^2} e^{-jmr_1} (R^2 - a^2) \cos^2 \Theta_1 + \\ & + j \frac{mK}{4r_2^2} e^{-jmr_2} (R^2 - a^2) \cos^2 \Theta_2. \end{aligned} \quad (6)$$

Для верхней окружности цилиндра формулы (1) и (2) неточны, т. к. не выполняется условие о дальности точки наблюдения. Однако погрешность не может быть значительной, т. к. поле в основном сосредоточено вблизи внутреннего провода. поэтому:

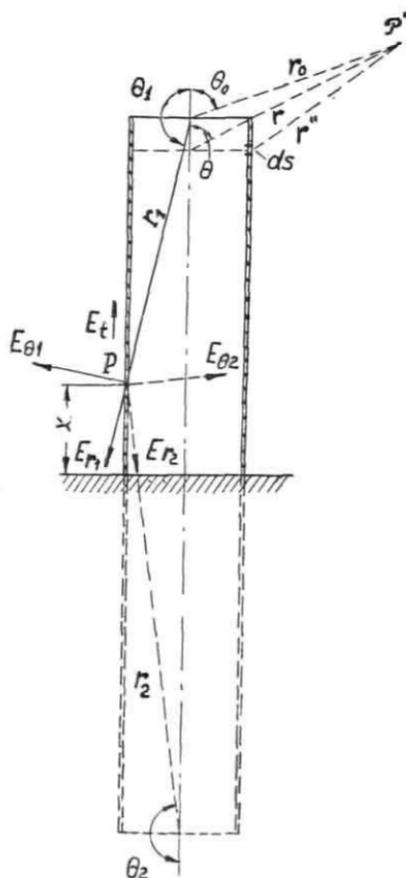
Для дальнейшего расчета воспользуемся опять методом эквивалентных магнитных токов, заменяя тангенциальное электрическое поле компенсирующими его поверхностными магнитными токами, плотность которых:

$$\bar{\delta}_m = [\bar{n} \bar{E}_t], \quad (7)$$

где \bar{n} — орт по направлению нормали.

Найдем электрический вектор-потенциал в точке P' , находящейся в плоскости $\varphi=0$, от магнитных токов на элементарной площадке $ds = dx \cdot R \cdot d\varphi$. В соответствии с обозначениями фиг. 3

$$dF_{\varphi} = \frac{E_t e^{-jmr''} \cdot dx \cdot R \cdot d\varphi}{4\pi r''} \cos \varphi, \quad (8)$$



Фиг. 3.

где F_{φ} — электрический вектор-потенциал, имеющий направление по касательной к параллельной окружности через точку P' , т. к. магнитные токи имеют направление по окружностям с центрами на оси цилиндра. Вместо r'' удобнее ввести r , заменяя дугу прямой:

$$r'' \approx r - R \sin \Theta \cos \varphi.$$

На больших расстояниях от экрана можно принять

$$\Theta \approx \Theta_0,$$

и тогда, также с приближением $r \approx r_0 + (h-x) \cos \Theta_0$,

поэтому

$$r'' \approx r_0 + (h-x) \cos \Theta_0 - R \sin \Theta_0 \cos \varphi. \quad (9)$$

В формуле (8) различие между r'' и r_0 важно только в отношении разности фаз, т. е. в множителе $e^{-jmr''}$, а в знаменателе для достаточно отдаленной точки наблюдения с небольшой погрешностью можно вместо r'' поставить r_0 . Интегрированием по всей внешней поверхности цилиндра находим:

$$F_\varphi = \frac{R}{4\pi r_0} e^{-jmr_0} \int_0^h E_t e^{-jm(h-x)\cos\Theta_0} \cdot dx \cdot \int_0^{2\pi} e^{-jmR \sin \Theta_0 \cos \varphi} \cdot \cos \varphi \cdot d\varphi. \quad (10)$$

Последний интеграл можно упростить, если принять, что радиус цилиндра малая величина по сравнению с длиной волны.

Тогда, разлагая подинтегральную функцию в степенный ряд и пренебрегая членами начиная со второго порядка ма-

лости — $\left(\frac{R}{\lambda}\right)^2 \sin^2 \Theta_0 \cos^2 \varphi$, будем иметь:

$$\begin{aligned} & \int_0^{2\pi} e^{jmR \sin \Theta_0 \cos \varphi} \cos \varphi \cdot d\varphi \approx \\ & \approx \int_0^{2\pi} (1 + jmR \sin \Theta_0 \cos \varphi) \cos \varphi \cdot d\varphi = jm \pi R \sin \Theta_0. \end{aligned}$$

Формулу (10) теперь можно переписать в следующем виде:

$$F_\varphi = \frac{jmR^2 \sin \Theta_0}{4r_0} e^{-jmr_0} \int_0^h E_t e^{-jm(h-x)\cos\Theta_0} \cdot dx. \quad (11)$$

Подставляя вместо E_t его значение из (6), получаем четыре выражения, непосредственное интегрирование которых представляет значительные математические трудности, т. к. r_1 , r_2 , Θ_1 , Θ_2 являются функциями x . Поэтому применяем при-

ближенное интегрирование по формуле Симпсона. Для рассматриваемого примера дополнительно к допущениям 1) и 2) примем:

$$h = \frac{\lambda}{4},$$

$$R = \frac{h}{5} = \frac{\lambda}{20}, \quad (12)$$

$$a < R; [R^2 - a^2] \approx R^2.$$

Тогда

$$F_{\varphi} = j 3,93 \cdot 10^{-3} \lambda \frac{e^{-jmr_0} \sin \theta_0}{r_0} \int_0^h E_t e^{-jm(h-x) \cos \theta_0} \cdot dx. \quad (13)$$

Для приближенного интегрирования по Симпсону применяем формулу трапеций для точек $x = 0, \frac{1}{4}h, \frac{1}{2}h, \frac{3}{4}h$ и h .

В результате приближенного интегрирования получаем:

$$\begin{aligned} F_{\varphi} = & j 1,225 \cdot 10^{-4} \frac{K \lambda \sin \theta_0}{r_0} e^{-jmr_0} [0,65 e^{-j2,2\theta_0} \cdot e^{-j90^\circ \cos \theta_0} + \\ & + 0,246 e^{-67,6^\circ \cos \theta_0} + 0,273 e^{j34^\circ} \cdot e^{-j45^\circ \cos \theta_0} + \\ & + 0,630 e^{j67^\circ} \cdot e^{j22,8^\circ \cos \theta_0} + 0,226 \cdot e^{j71^\circ}]. \quad (14) \end{aligned}$$

Напряженность электрического поля находим по формуле

$$\vec{E} = -\text{rot } \vec{F},$$

Тогда для системы сферических координат

$$E_{\theta} = \frac{\partial F_{\varphi}}{\partial r_0} + \frac{1}{r_0} F_{\varphi},$$

$$E_r = -\frac{1}{r_0 \sin \theta_0} \left[\sin \theta_0 \frac{\partial F_{\varphi}}{\partial \theta_0} + F_{\varphi} \cos \theta_0 \right].$$

Величина в квадратных скобках формулы (14) является функцией только Θ_0 , поэтому, обозначив ее как $f(\Theta_0)$ на основе предыдущих формул имеем:

$$E_\theta = 7,66 \cdot 10^{-4} \frac{K \sin \Theta_0}{r_0^2} e^{-jmr_0} f(\Theta_0), \quad (15)$$

$$E_r = \frac{1,225 \cdot 10^{-4} K \lambda}{r_0^2} e^{-jmr_0} \left[\sin \Theta_0 \frac{\partial f(\Theta_0)}{\partial \Theta_0} + f(\Theta_0) \cos \Theta_0 \right] \quad (16)$$

Формулу для E_r оставляем в неразвернутом виде, ибо получается слишком громоздкое выражение. Кроме того E_r меняется обратно пропорционально r^2 .. в расчете излучения учитывается только E_θ .

Напряженность магнитного поля находим по формуле:

$$\vec{H} = -j\omega \varepsilon_0 \vec{F} + \frac{1}{i\omega \mu_0} \text{grad div } \vec{F}.$$

В сферических координатах

$$\begin{aligned} \text{div } \vec{F} = & \frac{1}{r_0^2} \frac{\partial}{\partial r_0} (r_0^2 F_r) + \frac{1}{r_0 \sin \Theta_0} \frac{\partial}{\partial \Theta_0} (\sin \Theta_0 \cdot F_\theta) + \\ & + \frac{1}{r_0 \sin \Theta_0} \frac{\partial F_\varphi}{\partial \varphi}. \end{aligned}$$

Так как для данной задачи $F_r = 0$, $F_\theta = 0$ и $\frac{\partial F_\varphi}{\partial \varphi} = 0$, то $\text{div } \vec{F} = 0$

Поэтому будет только одна составляющая напряженности магнитного поля:

$$\begin{aligned} H_\varphi = & -j\omega \varepsilon_0 F_\varphi = \\ = & 1,225 \cdot 10^{-4} \frac{\omega \varepsilon_0 K \lambda \sin \Theta_0}{r_0} e^{-jmr_0} \cdot f(\Theta_0). \end{aligned} \quad (17)$$

Так же как и для излучения через отверстие

$$H_\varphi = \frac{\omega \varepsilon_0}{m} E_\theta = \frac{E_\theta}{\rho_\theta},$$

как это и должно быть в волновой зоне.

Числовой расчет показывает, что напряженность электрического поля в направлении максимального излучения, вызываемая в волновой зоне токами экрана, приблизительно в 10 раз меньше, чем поле от излучения через отверстие.

Интересно найти отношение мощности излучения неэкранированной антенны к мощности излучения через отверстие.

При условии, что ток в точке заземления антенны в обоих случаях имеет одинаковую величину, это отношение равно отношению сопротивлений излучения.

Сопротивление излучения отверстия, отнесенное к напряжению на конце антенны, дано (3):

$$R_{\Sigma II} = \frac{180}{\pi^2} \left[\frac{\lambda^2 \ln \frac{R}{a}}{S} \right]^2 \text{ ом.}$$

Пользуясь формулой идеального четвертьволнового трансформатора сопротивления, можно найти сопротивление излучения отнесенное к току в точке заземления.

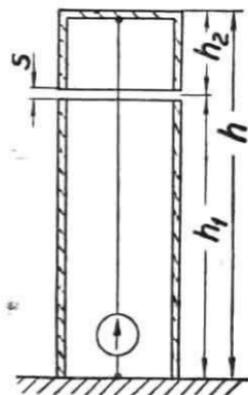
В нашем случае для $\frac{R}{\lambda} = \frac{1}{20}$, получаем:

$$R_{\Sigma I} = 0,0124 \text{ ом.}$$

Считая сопротивление излучения неэкранированной антенны 36,5 ом, отношение мощностей будет 2950.

Б. Цилиндрический экран с кольцевым отверстием

Рассмотрим другой пример, в котором явно обнаруживается связь между излучателем и экраном.



Фиг. 4.

Будем считать, что экран имеет такие же размеры, какие были в предыдущей задаче.

Экран имеет кольцевую щель, верхний конец антенны соединен также с верхним торцом. (фиг. 4).

Сделаем расчет мощностей, излученных как через щель, так и токами на внешней поверхности экрана, наводимыми в нем через связь с внутренней антенной.

1. Излучение через щель.

Примем, что ширина щели s мала по сравнению с длиной волны и размерами экрана. Тогда напряженность электрического поля по ширине щели можно считать постоянной и имеющей тангенциальное направление к образующей цилиндра.

Величина напряженности:

$$E_t = \frac{U_2}{s} \quad (18)$$

где U_2 — амплитуда напряжения между краями щели.

Задача излучения через щель решается аналогично предыдущей. Воспользуемся выражением электрического векторного потенциала от эквивалентных магнитных токов на поверхности цилиндра (11). Изменим в нем границы интегрирования на

$$h_1 \text{ и } h_1 + s$$

и поставим знак минуса, поэтому теперь

$$\delta_m = -[\overline{nE}_t],$$

ибо поле магнитных токов не должно компенсировать E_t , а совпадать с ней по направлению. Тогда имеем:

$$F_\varphi = -\frac{j m R^2 \sin \theta_0}{4 r_0} e^{-j m r_0} \int_{h_1}^{h_1+s} E_t e^{-j m (h-x) \cos \theta_0} \cdot dx. \quad (19)$$

причем

$$\begin{aligned} & \int_{h_1}^{h_1+s} E_t e^{-j m (h-x) \cos \theta_0} \cdot dx = \\ & = -\frac{j E_t}{m \cos \theta_0} e^{-j m (h-h_1) \cos \theta_0} \cdot [e^{j m s \cos \theta_0} - 1]. \end{aligned}$$

Так как $jms \cos \Theta_0 = j2\pi \frac{s}{\lambda} \cos \Theta_0$ — малая величина, выражение в скобках можно разложить в степенный ряд и ограничиться только двумя первыми членами разложения

$$e^{jms \cos \Theta_0} - 1 \approx jms \cos \Theta_0.$$

С учетом (18) интеграл формулы (19) выражается как

$$U_2 \cdot e^{-jm(h-h_1) \cos \Theta_0}.$$

Поэтому:

$$F_{\varphi} = -j \frac{U_2 m^2 R^2 \sin \Theta_0}{4r_0} e^{-jmr_0} \cdot e^{-jm(h-h_1) \cos \Theta_0}. \quad (20)$$

По обычным формулам для цилиндрических координат находят:

$$E_{\theta} = -\frac{U_2 m R^2 \sin \Theta_0}{4r_0} e^{-jmr_0} \cdot e^{-jm(h-h_1) \cos \Theta_0}, \quad (21)$$

$$E_r = j \frac{U_2 m R^2}{4r_0^2} e^{-jmr_0} \cdot e^{-jm(h-h_1) \cos \Theta_0} \cdot [2 \cos \Theta_0 + \\ + jm(h-h_1) \sin^2 \Theta_0], \quad (22)$$

$$H_{\varphi} = -\frac{mR^2 U_2 \omega \varepsilon_0 \sin \Theta_0}{4r_0} e^{-jmr_0} \cdot e^{-jm(h-h_1) \cos \Theta_0}. \quad (23)$$

$$\text{Так как } \frac{m}{\varepsilon_0 \omega} = \rho_0, \text{ то } H_{\varphi} = \frac{E_{\theta}}{\rho_0}.$$

В полученные формулы не входит ширина щели s . Это объясняется тем, что при постоянной величине U_2 напряженность E_t уменьшается обратно пропорционально s , между тем как поверхность щели увеличивается прямо пропорционально s , что и приводит к независимости векторного потенциала от ширины щели. Указанное постоянство векторного потенциала при изменении s имеет место, конечно, только при малой ширине щели.

На больших расстояниях от экрана, когда

$$r_0 > (h - h_1) \cos \Theta_0,$$

$$e^{-jmr_0} \cdot e^{-jm(h-h_1)\cos\Theta_0} \approx e^{-jmr_0}$$

и выражения E_Θ и H_φ упрощаются:

$$E_\Theta = -\frac{U_2 m^2 R^2 \sin \Theta_0}{4r_0} e^{-jmr_0}, \quad (24)$$

$$H_\varphi = -\frac{U_2 m \omega \varepsilon_0 R^2 \sin \Theta_0}{4r_0} e^{-jmr_0}. \quad (25)$$

Мощность, излучаемая через щель, определяется интегрированием вектора Умова—Пойнтинга по отдаленной сфере:

$$\begin{aligned} P_\Sigma &= \int_0^\pi |E_\Theta| \cdot |H_\varphi| 2\pi r_0^2 \sin \Theta_0 d\Theta_0 = \\ &= \frac{\pi}{8} U_2^2 m^2 R^4 \omega \varepsilon_0 \int_0^\pi \sin^3 \Theta_0 d\Theta_0 = \frac{\pi}{6} \frac{U_2^2 m^4 R^4}{\rho_0}. \end{aligned} \quad (26)$$

Для расчета излученной мощности мы воспользовались формулами (24), (25), не учитывающими влияние земли. Так как для упрощения считаем землю идеально проводящей, то потерь в ней нет и интегрирование вектора Умова—Пойнтинга в неограниченном пространстве в границах $\Theta_0 = 0$ и $\Theta_0 = \pi$ дает всю излученную мощность.

2. Излучение экрана.

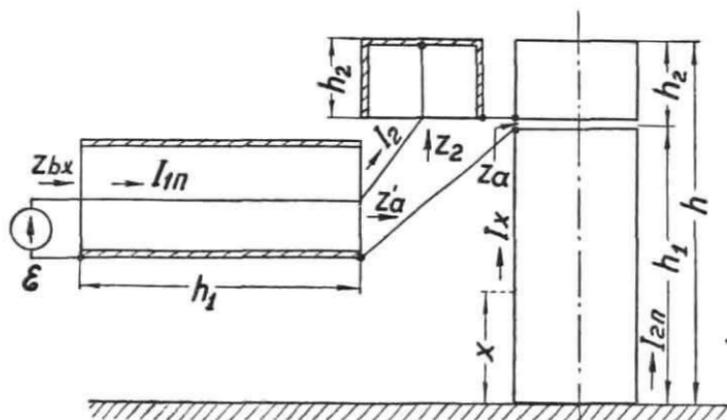
Если между излучателем и системой экранов имеется связь, то экран возбуждается и становится вторичным излучателем.

В рассматриваемом примере связь явно обнаруживается с точки зрения теории цепей. С внутренней стороны система представляет коаксиальный кабель, к которому можно применить теорию линий. Внешняя система является широкополосным излучателем, волновое сопротивление которого меняется по его длине. Однако, в литературе (4) даются формулы для

приближенного расчета волнового сопротивления толстых цилиндрических излучателей, которое считается постоянным по его длине.

Экспериментальные данные, приведенные в том же источнике, показывают, что для четвертьволнового излучателя с отношением длины к диаметру экрана, равным 4,35, характеристика направленности излучения мало отличается от характеристики тонкого излучателя. Поэтому с учетом емкости верхней торцевой поверхности цилиндра приближенно можно принять синусоидальное распределение тока по эквивалентной высоте цилиндра.

Если внутреннюю систему разположить вне цилиндра, то всю систему можно заменить эквивалентной схемой, показанной на фиг. 5.



Фиг. 5.

Отрезки длиной h_1 и h_2 , расположенные на рис. 5 вне экрана, представляют внутреннюю систему экрана, присоединенную к внешней, излучающей поверхности экрана. Соединительных проводов между ними в действительности нет, т. к. внутренняя поверхность у края щели непосредственно соединена с внешней.

На основе этой эквивалентной схемы можно найти величины, характеризующие связь между первичным — внутренним излучателем и вторичным излучателем — внешней поверхностью экрана. Для этого воспользуемся основными уравнениями двух связанных антенн (фиг. 5).

$$\begin{aligned} U_1 &= I_{1n} Z_{11} + I_{2n} Z_m, \\ 0 &= I_{2n} Z_{22} + I_{1n} Z_m. \end{aligned} \quad (27)$$

В этих формулах:

- Z_{11}, Z_{22} — собственные входные сопротивления антенн;
 Z_m — взаимное сопротивление между ними,
 I_{1n}, I_{2n} — токи в местах заземления антенн.

Из первого уравнения имеем:

$$Z_m = \frac{U_1}{I_{2n}} - \frac{I_{1n}}{I_{2n}} Z_{11} = Z_c - \frac{I_{1n}}{I_{2n}} Z_{11}, \quad (28)$$

где Z_c — сопротивление связи между антеннами.

Собственное сопротивление антенны представляет величину входного сопротивления ее, если все остальные антенны, связанные с данной, удалены.

Если практически другие антенны удалить нельзя, то их следует расстроить относительно частоты, на которую настроена данная антенна.

В нашем случае для расстройки внешней антенны считаем ее отъединенной от земли. Тогда Z_{11} находим как входное сопротивление коаксиального кабеля длиной h_1 , нагруженного

сопротивлением $Z'_{ao} = Z_2 + Z_{ao}$:

$$Z_{11} = |Z_{bx}| Z_{ao} = \rho_1 \frac{Z'_{ao} + j\rho_1 \operatorname{tg} mh_1}{\rho_1 + jZ'_{ao} \operatorname{tg} mh_1}, \quad (29)$$

где: Z_o — входное сопротивление короткозамкнутого отрезка длиной h_2 ,

Z_a — входное сопротивление излучающего цилиндра на высоте щели при удаленной внутренней антенне,

Z_{ao} — предыдущая величина для случая отъединенного от земли цилиндра,

ρ_1 — волновое сопротивление коаксиального кабеля.

Формула (29) дана для случая малых потерь во внутренней системе.

Принимая синусоидальное распределение тока по высоте цилиндра, ток на высоте h_1 будет:

$$I_x = I_{2n} \sin m(h_{oe} - x), \quad (30)$$

$$\text{где: } h_{oe} = h_1 + h_2 + b_{oe}; \quad mb_{oe} = \arctg \frac{1}{\omega C \rho_2}$$

b_{oe} — удлинение цилиндра, эквивалентное емкости торцевой поверхности (c),

ρ_2 — волновое сопротивление внешней поверхности цилиндра.

Для $x = h_1$ будем иметь:

$$I_{2n} = \frac{I_2}{\sin m(h_2 + b_{oe})}. \quad (31)$$

Из основных уравнений нагруженной линии имеем:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{1}{\rho_1} (\rho_1 \cos mh_1 + jZ'_a \sin mh_1) \quad (32)$$

$$\text{где } Z'_a = Z_2 + Z_a.$$

Подставляя I_2 из (31) в (32), и учтя, что в месте заземления $I_1 = I_{1n}$, получим:

$$\frac{I_{1n}}{I_{2n}} = \frac{1}{\rho_1} [\rho_1 \cos mh_1 + jZ'_a \sin mh_1] \sin m(h_2 + b_{oe}).$$

Входные сопротивления Z_{ao} и Z_a можно рассматривать как последовательное соединение двух линий: верхней — длиной h_1 , работающей в режиме холостого хода и нижней — длиной h_2 — короткозамкнутой, если нижний конец заземлен, или тоже разомкнутой, если нижний конец цилиндра от земли отъединен.

Для первого случая имеем:

$$Z_a = \rho_2 [th \gamma h_1 + cth(\gamma h_2 + \Theta)],$$

$$Z'_a = j\rho_1 \operatorname{tg} mh_2 + \rho_2 [th \gamma h_1 + cth(\gamma h_2 + \Theta)], \quad (33)$$

для второго:

$$Z_{ao} = \rho_2 [cth \gamma h_1 + cth (\gamma h_2 + \Theta)],$$

$$Z'_{ao} = j\rho_1 tg mh_2 + \rho_2 [cth \gamma h_1 + cth (\gamma h_2 + \Theta)]. \quad (34)$$

Здесь $\gamma = \beta + j\alpha$ — коэффициент распространения и

$$\Theta = Arth j\rho_2 \omega c.$$

Воспользовавшись (31), (32) и соотношением

$\frac{U_1}{Z_{bx}} = I_{1n}$ находим сопротивление связи:

$$Z_c = \frac{U_1}{I_{2n}} = \frac{Z_{bx}}{\rho_1} \sin m(h_2 + b_{oe}) \cdot (\cos mh_1 + jz_a \sin mh_1).$$

Подставляя в последнее выражение значение

$$Z_{bx} = \rho_1 \frac{Z'_a + j\rho_1 tg mh_1}{\rho_1 + jz'_a tg mh_1},$$

находим

$$Z_c = (Z'_a + j\rho_1 tg mh_1) \cos mh_1 \cdot \sin m(h_2 + b_{oe}) \quad (35)$$

Наконец, подставляя все найденные величины в выражение (28), после преобразования получаем:

$$Z_m = \frac{(Z'_a - Z'_{ao}) \sin m(h_2 + b_{oe})}{\cos mh_1 + j \frac{Z'_{ao}}{\rho_1} \sin mh_1} \quad (36)$$

Из рассмотрения эквивалентной схемы очевидно, что имеются два положения щели, при которых связь между внутренним излучателем и внешней, излучающей системой экрана получается минимальной:

- 1) щель у основания цилиндра,
- 2) щель у верхнего торца цилиндра.

В первом случае верхняя часть внутренней системы длиной четверть волны имеет большое входное сопротивление Z_2 , поэтому I_2 — малый.

Во втором случае сопротивление щели стремится к бесконечности, так как верхняя часть внешней системы цилиндра тогда представляет собой разомкнутую линию малой длины b_{oe} , с большим входным сопротивлением, поэтому также Z'_a будет большим, а I_2 — малой величиной.

Такие же выводы дает формула (36).

Для нижнего положения щели уже по определению

$$|Z_a|_{h_1=0} = |Z_{oa}|_{h_1=0},$$

поэтому также $Z'_a = Z'_{a0}$ и $Z_m = 0$.

Для верхнего положения щели $h_1 = \frac{\lambda}{4}$, $h_2 = 0$,

подставляя в (36), после преобразования получаем:

$$Z_m = j \frac{2 \rho_1 \sin mb_{oe}}{\operatorname{sh} 2\gamma h \cdot (th \gamma h + ct h \theta)}.$$

При малом b_{oe} , Z_m тоже малая величина. Для

$$b_{oe} = 0, Z_m = 0$$

Мощность, излученная экраном:

$$P_s = |I_{2n}|^2 R_\Sigma,$$

где R_Σ — сопротивление излучения цилиндрического экрана, приведенное к месту пучности тока.

Для заданной величины I_{1n} из второго уравнения (27) имеем

$$I_{2n} = -I_{1n} \frac{Z_m}{Z_{22}},$$

и тогда

$$P_s = |I_{1n}|^2 \frac{R_\Sigma}{|Z_{22}|^2} |Z_m|^2.$$

Так как R_Σ и Z_{22} не зависят от положения щели, то при постоянном I_{1n} мощность излучения пропорциональна второй степени взаимного сопротивления.

Данные сопротивления излучения R_{Σ} толстых цилиндров даны в литературе [4].

Числовые расчеты для $h_1 = \frac{3}{4} h$ показали, что в этом случае мощность, излученная экраном, в 50 раз больше мощности, излученной через щель.

Рассмотренный пример находится очевидно в противоречии с основными правилами экранирования, так как экран разделен на две отдельные части, а излучатель соединен с экраном в двух точках.

В действительности — это пример эффективно излучающего устройства, которое может быть применено в роли антенны верхнего питания.

Однако такой пример был выбран намеренно с целью наиболее резко проиллюстрировать роль излучения экрана при экранировании.

Найдем и в этом случае отношение мощности излучения незэкранированного излучателя к мощности излучения через кольцевую щель в случае нерезонирующего экрана.

Приравняв выражение (26) к мощности излучения, выраженной через сопротивление излучения $R_{\Sigma u}$, отнесенное к напряжению на щели U_2 , имеем:

$$R_{\Sigma u} = \frac{45}{\pi^4} \left(\frac{\lambda}{R} \right)^4.$$

Для случая верхнего положения щели эту величину можно привести к точке заземления антенны по формуле четверть-волновой линии:

$$R_{\Sigma l} = \frac{\rho_1^2}{R_{\Sigma u}} = \frac{\pi^4}{45} \rho_1^4 \left(\frac{R}{\lambda} \right)^4.$$

Для

$$\rho_1 = 180 \text{ ом и } \frac{R}{\lambda} = \frac{1}{20}$$

получаем:

$$R_{\Sigma l} = 0,44 \text{ ом.}$$

Сравнивая эту величину с сопротивлением свободно излучающей четвертьволновой антенны находим, что при одинаковых токах в антенне, мощность излучения при экранировании уменьшается 166 раз.

Заключение

Числовые расчеты, сделанные по формулам первого примера, показали, что мощность излучения токов в экране составляет величину порядка только одного процента мощности, излученной через торцевое отверстие. Поэтому можно считать, что в этом случае экран практически не возбуждается. В случае второго примера расчеты показали противоположную картину: мощность излучения через щель имеет величину порядка нескольких процентов по сравнению с мощностью излучения от токов возбужденного экрана.

Проведенные эксперименты подтвердили теоретически сказанную зависимость излучения от высоты щели во втором примере и отсутствие возбуждения экрана в случае первого примера.

Описание эксперимента и его конкретные результаты будут даны в следующем выпуске ученых записок Латвийского Государственного Университета.

Из сделанной работы следуют важные для практики экранирования выводы, что в случаях, когда размеры экрана соизмеримы с длиной волны, необходимо бороться с излучением последнего, т. к. оно тогда может быть больше излучения через отверстия и щели.

Для этого необходимо или устранить причину возбуждения экрана, т. е. элементы связи, или расстроить внешнюю систему экрана относительно рабочей частоты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Я. Н. Фельд. Основы теории щелевых антенн, 1948 г.
2. Р. Д. Юкна. Определение степени электромагнитного экранирования в диапазонах коротких и ультракоротких волн взаимным сопротивлением между внутренней и внешней системами. Ученые записки Латвийского Государственного Университета, т. X, 1957 г.
3. С. Рамо и Дж. Уиннери. Поля и волны в современной радиотехнике. 1948 г.
4. Техника сверхвысоких частот, под ред. проф. Я. Н. Фельда. 1952 г.

Я. Я. ОСИС.

ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛОЖИТЕЛЬНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ В СИСТЕМЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Одним из актуальнейших вопросов современной науки и техники является автоматизация производственных процессов всех отраслей народного хозяйства. Успешное решение этого вопроса во многом зависит от широкого применения систем автоматизированного электропривода. Непрерывно возрастающие требования, предъявляемые к качеству продукции бумажной, текстильной, металлургической и других видов промышленности, а также стремление повысить производительность труда приводят к необходимости создания новых, более совершенных систем автоматизированного электропривода, которые должны обеспечить большую точность регулирования в статических режимах и устойчивую работу в динамических режимах. Кроме того, переходный процесс указанных систем должен затухать быстро и без значительных колебаний.

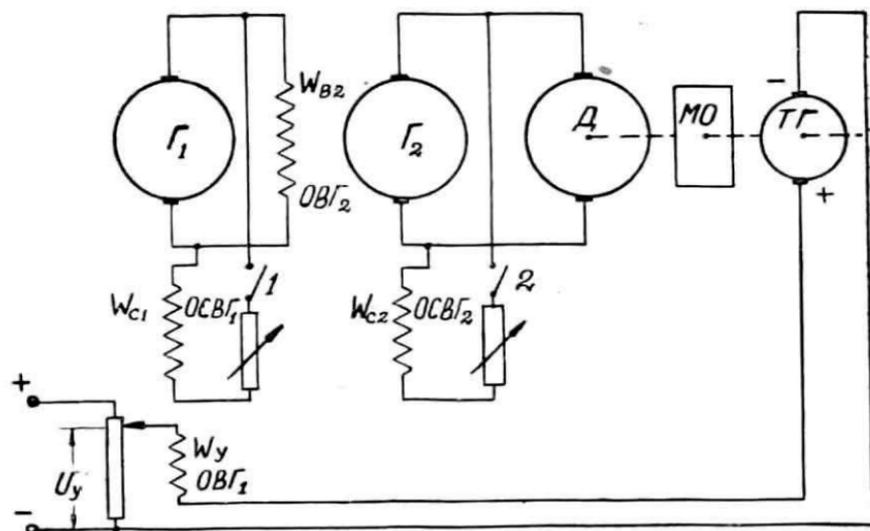
Точность системы автоматического регулирования, как известно, зависит от коэффициента усиления системы: чем больше коэффициент усиления, тем больше точность регулирования. Однако, устойчивость системы и показатели качества переходного процесса (быстродействие, колебательность, перерегулирование) ухудшаются с увеличением коэффициента усиления системы. Таким образом, создание точной и высококачественной системы автоматического регулирования (САР) связано с преодолением этого противоречия. Этот вопрос достаточно освещен в трудах по общей теории автоматического регулирования [1], [2], [3], [4], [5], [6].

Коэффициент усиления системы может быть увеличен применением внутренней жесткой положительной обратной связи по напряжению. В дальнейшем для простоты последнюю будем называть положительной обратной связью (ПОС).

Целью данной работы является выявление такого соотношения между параметрами САР, которое давало бы возмож-

ность применить положительную обратную связь и, тем самым, значительно повысить точность регулирования системы, при этом не оказывая существенного влияния на переходный процесс. В работах Д. И. Марьяновского [7] и [8] не раскрыты полностью все свойства обратных связей, так как, пользуясь алгебраическими методами исследования устойчивости, он получил громоздкие выражения, затрудняющие дальнейший анализ. В работе А. А. Вавилова [9] указан иной подход в этому вопросу. Он предложил использовать логарифмический критерий устойчивости. В настоящей работе сделана попытка развить дальше идеи А. А. Вавилова. Представленная работа содержит:

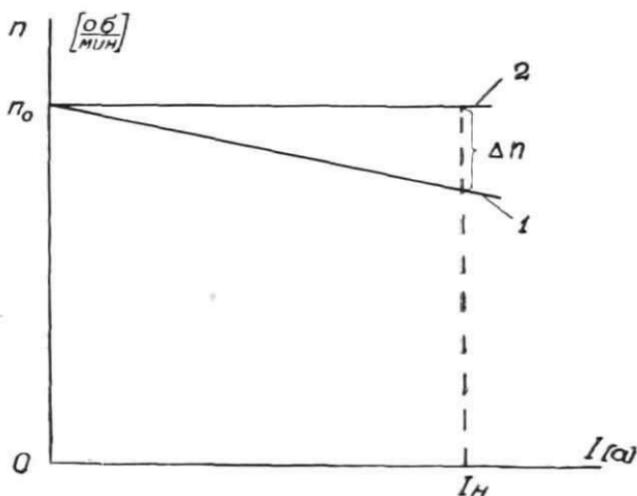
1. Исследование влияния положительной обратной связи на точность САР электропривода.
2. Исследование влияния ПОС на устойчивость системы и качество переходного процесса.
3. Рекомендации по выбору структуры системы с применением положительной обратной связи.
4. Сведения об экспериментальном подтверждении теоретических выводов.



Фиг. 1. Схема системы автоматизированного электропривода. G_1 и G_2 — генераторы. D — двигатель. MO — машина-орудие. $TГ$ — тахогенератор. $OBГ_1$ и $OBГ_2$ — обмотки возбуждения генераторов. $OCBГ_1$ и $OCBГ_2$ — обмотки самовозбуждения (положительной обратной связи по напряжению).

1. Рассмотрим влияние положительной обратной связи на точность САР. На фиг. 1 изображена замкнутая САР электро-

привода по схеме генератор-двигатель с отдельным возбудителем генератора. Сначала рассмотрим работу системы без ПОС, т. е. рубильники 1 и 2 разомкнуты. Для получения заданных оборотов привода на вход САР подается напряжение управления — U_y , которое усиливается в генераторах Γ_1 и Γ_2 и подается на якорь двигателя Д. На ось машины орудия МО посажен тахогенератор, напряжение которого линейно связано с оборотами привода « n ». Напряжение тахогенератора подается на вход системы так, что при увеличении оборотов привода (напр., вследствие сброса нагрузки) оно вычитается из U_y , а при уменьшении оборотов — складывается с U_y . Этим самым осуществляется отрицательная обратная связь по скорости вращения двигателя. Таким образом, при заданном U_y система электропривода будет поддерживать определенное число оборотов. Однако, регулирование в данном случае будет происходить по статическому закону (см. фиг. 2 прямая 1).



Фиг. 2. Внешние характеристики электропривода.

Линеаризованное уравнение статической характеристики системы электропривода без учета реакции якоря и эдс остаточного магнетизма будет иметь вид:

$$n = \frac{k_1 k_2 k_\partial U_y}{1 + k_1 k_2 k_m} - \frac{k_\partial I R_0}{1 + k_1 k_2 k_m}, \quad (1)$$

где k_1 и k_2 — коэффициенты усиления по напряжению соответствующих генераторов,

k_∂ — коэффициент передачи двигателя,

k_m — коэффициент усиления по напряжению тахогенератора,

$$R_0 = R_z + R_\partial,$$

R_r — активное сопротивление якоря генератора,

R_∂ — активное сопротивление якоря двигателя.

Второй член выражения (1) представляет собой перепад скорости Δn , обусловленный падением напряжения на сопротивлении R_0 .

При охвате первого генератора положительной обратной связью (рубильник 1 на фиг. 1 замкнут) уравнение статической характеристики системы примет вид

$$n = \frac{k_1 k_2 k_\partial U_y}{1 - k_{n1} + k_1 k_2 k_m} - \frac{k_\partial I R_0 (1 - k_{n1})}{1 - k_{n1} + k_1 k_2 k_m}, \quad (2)$$

где k_{n1} — коэффициент положительной обратной связи первого генератора.

Если $k_{n1} = 1$, то $\Delta n = 0$ и регулирование будет происходить по астатическому закону (прямая 2 на фиг. 2).

Охватывая второй генератор положительной обратной связью, соответственно получим

$$n = \frac{k_1 k_2 k_\partial U_y}{1 - k_{n2} + k_1 k_2 k_m} - \frac{k_\partial I R_z}{1 - k_{n2} + k_1 k_2 k_m} - \frac{k_\partial I R_\partial (1 - k_{n2})}{1 - k_{n2} + k_1 k_2 k_m}, \quad (3)$$

где k_{n2} — коэффициент ПОС второго генератора.

Исследование выражений (1), (2) и (3) приводит к следующему заключению: с точки зрения достижения большей точности регулирования ПОС желательно иметь в начале системы. Этот вывод, полученный при рассмотрении системы возбудитель — генератор — двигатель, может быть распространен на системы с любым числом последовательно работающих генераторов, напр., на системы с многоступенчатыми ЭМУ (электромашинные усилители) как с продольным, так и с поперечным полем.

2. Как уже было отмечено, для исследования влияния положительной обратной связи на устойчивость системы целесообразно пользоваться логарифмическим критерием устойчивости. Логарифмический критерий устойчивости формулируется следующим образом: «Для того чтобы система, устойчивая в разомкнутом состоянии, была устойчива в замкнутом состоянии, необходимо и достаточно, чтобы при всех частотах, при которых логарифмическая амплитудная частотная характеристика (ЛАЧХ) не отрицательна, т. е. $L(\omega) \geq 0$, значение фазы $\varphi(\omega)$ превосходило $-\pi$ » [4]. Преимущество вышеупомянутого критерия заключается в том, что устойчивость системы исследуется графоаналитическим методом, позволяющим наглядно произвести количественную оценку влияния ПОС на устойчивость системы.

При исследовании устойчивости замкнутой системы регулирования необходимо знать передаточную функцию разомкнутой системы. Для системы автоматизированного электропривода, изображенной на фиг. 1, после замены реальных звеньев (возбудитель, генератор, двигатель и тахогенератор) элементарными звеньями, передаточная функция разомкнутой системы примет вид

$$K(p) = \frac{k_1 k_2 k_3 k_m}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)(T_M T_J p^2 + T_M p + 1)}, \quad (4)$$

где: k_3 — коэффициент усиления по напряжению двигателя,
 T_1 и T_2 — электромагнитные постоянные времени обмоток возбуждения генераторов,
 T_J — электромагнитная постоянная времени якорной цепи двигателя,
 T_M — электромеханическая постоянная времени двигателя,
 $p = \frac{d}{dt}$ — символ дифференцирования.

При составлении выражения (4) пренебрегалось:

1. остаточным магнетизмом и гистерезисом,
2. вихревыми токами,
3. изменением коэффициента самоиндукции, вследствие нелинейности кривой намагничивания,
4. взаимной индукцией между обмотками машин,
5. изменением числа оборотов приводных двигателей генераторов,
6. изменением потока возбуждения двигателя.

На практике часто $T_M \geq 4T_{\text{ср}}$. Тогда двигатель после соответствующего преобразования может быть представлен двумя аperiodическими звеньями с постоянными времени соответственно T_3 и T_4 . Выражение (4) запишется следующим образом:

$$K(p) = \frac{k_1 k_2 k_3 k_m}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)(T_3 p + 1)(T_4 p + 1)}. \quad (5)$$

Для построения логарифмической фазовой частотной характеристики (ЛФЧХ) системы, состоящей только из аperiodических звеньев, пользуемся выражением:

$$\varphi(\omega) = \sum_{i=1}^{i=4} \varphi_i(\omega) = \sum_{i=1}^{i=4} -\arctg T_i \omega, \quad (6)$$

где T_i — постоянная времени соответствующего звена.

Допустим, что положительная обратная связь безинерционна, тогда выражение передаточной функции звена, охваченного обратной связью, примет следующий вид

$$K_1(p) = \frac{k}{Tp - k_n + 1}. \quad (7)$$

Выражение (7) можем преобразовать к виду

$$K_1(p) = \frac{k'}{T'p + 1}, \quad (8)$$

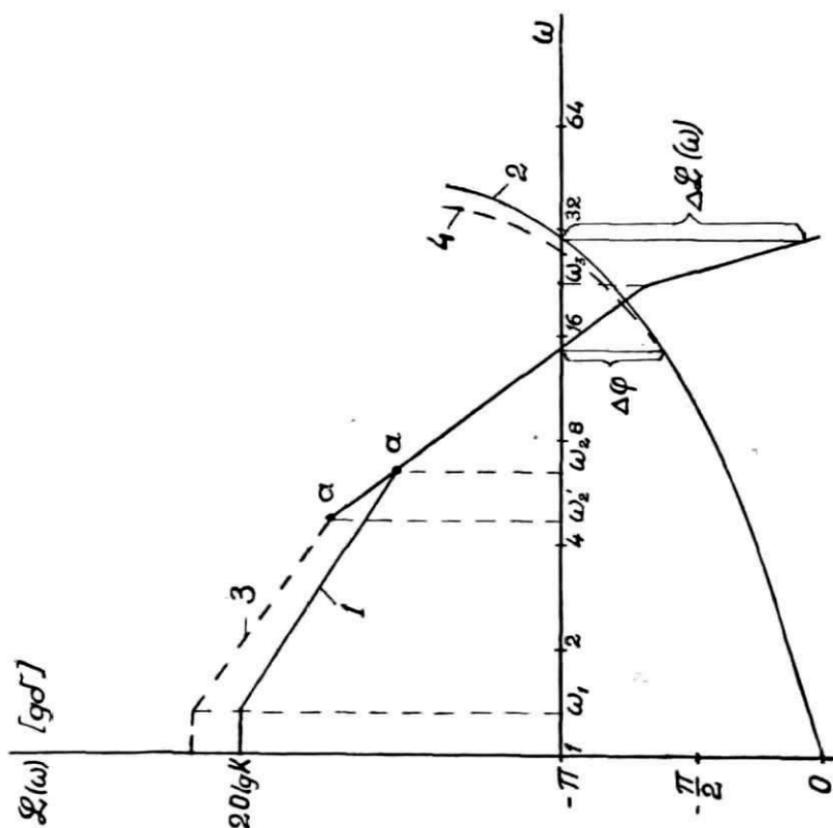
где

$$T' = \frac{T}{1 - k_n}, \quad (9)$$

$$k' = \frac{k}{1 - k_n}. \quad (10)$$

Выражения (9) и (10) показывают, что звено, охваченное ПОС, может быть представлено некоторым новым аperiodическим

ским звеном с постоянной времени T' и коэффициентом усиления по напряжению k' . Если $k_n = 1$ (что соответствует критическому самовозбуждению генератора), то $k' = \infty$ и $T' = \infty$. Пользуясь выражениями (5) и (6), получим суммарные ЛАЧХ и ЛФЧХ рассматриваемой системы (см. фиг. 3 соответственно кривые 1 и 2). При построении характеристик использовались логарифмические единицы, октава по оси абсцисс и децибелл по оси ординат.



Фиг. 3. Логарифмические частотные характеристики системы.

Наклон ЛАЧХ меняется при т. н. частотах сопряжения ω_1 , ω_2 и т. д. Для апериодического звена значение частоты сопряжения равно

$$\omega_s = \frac{1}{T_i}. \quad (11)$$

Согласно определению логарифмического критерия данная система устойчива, так как при $L(\omega) = 0$ $\varphi > -180^\circ$. Отрезок $\Delta\varphi$ представляет собою запас устойчивости по фазе, а $\Delta L(\omega)$ — запас устойчивости по модулю.

Проследим как влияет охват какого-либо звена положительной обратной связью на вид отдельных логарифмических частотных характеристик. Допустим, что ПОС охвачено звеном, частота сопряжения ω_s которого удовлетворяет неравенству

$$\omega_s > \omega_c \quad (a)$$

где ω_c — частота среза ЛАЧХ, т. е. частота при которой $L(\omega) = 0$.

Возьмем для примера второе звено с частотой сопряжения ω_2 ($\omega_2 > \omega_c$). После охвата второго звена ПОС логарифмическая амплитудная частотная характеристика перемещается вверх, вследствие увеличения общего коэффициента усиления системы (см. фиг. 3 кривая 3), а частота сопряжения перемещается влево (см. точки a и a'), причем частота среза ЛАЧХ ω_c не меняется. ЛФЧХ также перемещается вверх (кривая 4).

Таким образом, запасы устойчивости по модулю и по фазе уменьшаются, а показатель колебательности M , характеризующий, как известно, качество переходного процесса, увеличивается.

Остается выяснить количественную сторону вопроса. Так как при соблюдении условия (a) ω_c остается на месте, то изменение запаса устойчивости обусловлено перемещением ЛФЧХ. Выражение фазового угла звена, охваченного положительной обратной связью будет

$$\varphi' = -\arctg T'\omega \quad (12)$$

или

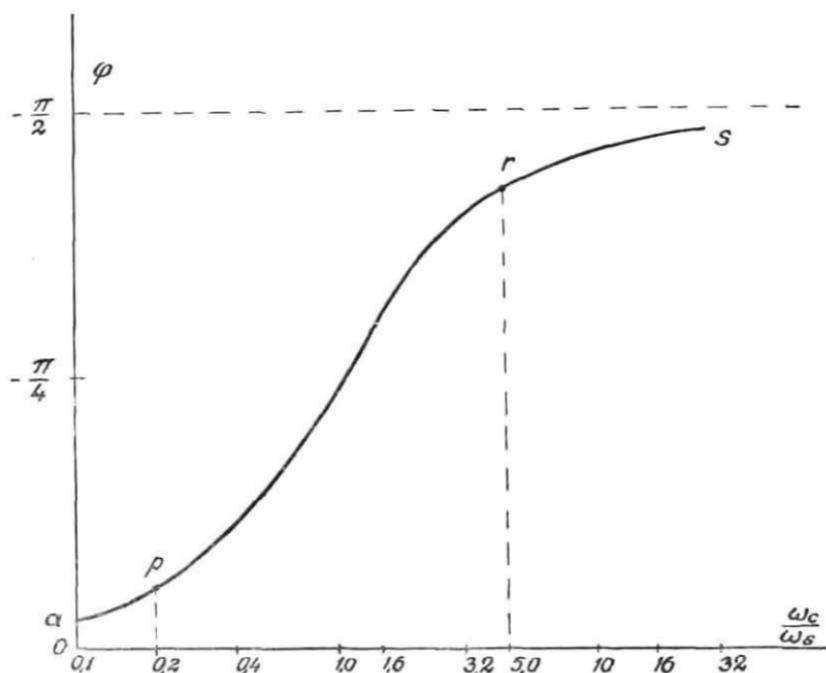
$$\varphi' = -\arctg \frac{\omega}{\omega_s}. \quad (13)$$

Если $k_n = 1$, то $\omega' = \frac{1}{T'} = 0$ и $\varphi = -90^\circ$. Это значит, что ЛФЧХ звена не зависит от частоты, а имеет постоянное значение равное -90° . Поскольку нас интересует в основном значение $\varphi(\omega)$ при $L(\omega) = 0$, т. е. при $\omega = \omega_c$, то выразим (13) как $\varphi = f(\omega_s)$.

Итак,

$$\varphi = -\arctg \frac{\omega_c}{\omega_s}. \quad (14)$$

Подставляя в выражение (14) значения ω_s от 0 до ∞ , получаем кривую, изображенную на фиг. 4, анализируя которую приходим к следующему заключению:



Фиг. 4. Зависимость $\varphi = f\left(\frac{\omega_c}{\omega_s}\right)$.

1. Устойчивость системы регулирования практически не изменяется, если положительная обратная связь охватывает звено с постоянной времени

$$T \geq \frac{5}{\omega_c} \quad (15)$$

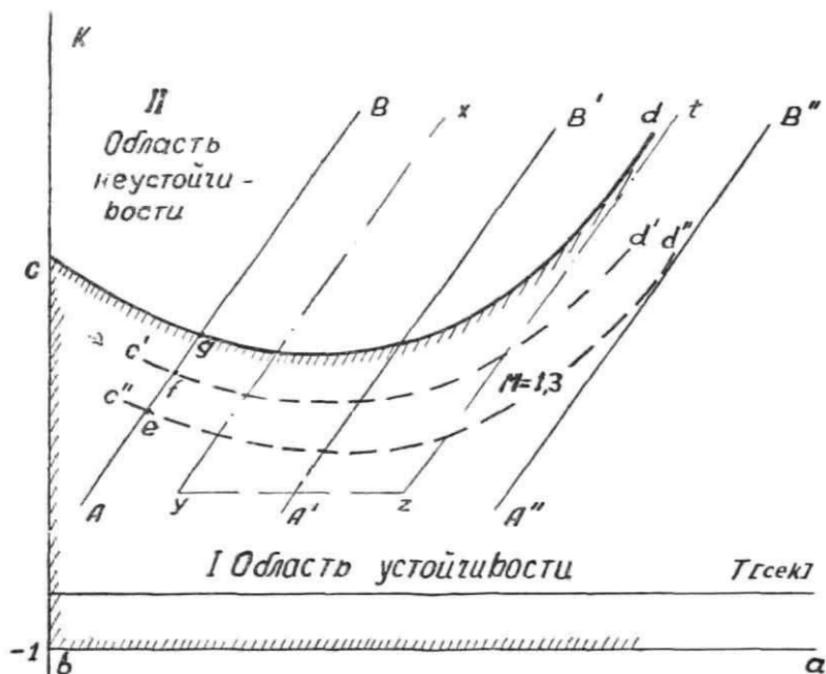
Это соответствует участку кривой rs (фиг. 4).

2. Положительная обратная связь практически не влияет на устойчивость системы, если имеет место неравенство

$$\frac{T}{1 - k_n} \leq \frac{0,2}{\omega_c} \quad (16)$$

Это соответствует участку кривой ap .

Более наглядное представление о влиянии ПОС на устойчивость системы и качество переходного процесса дает Д — разбиение по общему коэффициенту усиления системы « k » и постоянной времени « T » звена, охватываемого ПОС.



Фиг. 5. Д — разбиение по общему коэффициенту усиления системы k и постоянной времени T .

На фиг. 5 построена область устойчивости с помощью Д-разбиения по параметрам k и T для рассматриваемой системы с передаточной функцией 4-го порядка. Величины по осям отложены в логарифмическом масштабе.

Устойчивая работа САР будет в том случае, если значения k и T расположены в области устойчивости I, ограниченной кривой $abcd$. Так как в реальных системах автоматического регулирования мы имеем дело с положительными значениями коэффициента усиления, то для нас наибольший интерес представляет кривая cd , т. е. граница устойчивости. Если параметры системы таковы, что точка лежит на кривой cd , то система имеет запас устойчивости равный нулю, а показатель колебательности $M = \infty$. Чем дальше рабочая точка от границы устойчивости, тем больше запас устойчивости.

На фиг. 5 изображены уровни запаса устойчивости системы и показателя колебательности (см. кривые $c'd'$ и $c''d''$). Параметры k , T и k_n связаны между собой соотношениями (9) и (10).

При изменении k_n геометрическим местом точек с координатами k' , T' является прямая, тангенс угла наклона которой равен

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{m_{T'}}{m_{k'}}, \quad (17)$$

где $m_{T'}$ — масштаб постоянной времени,
 $m_{k'}$ — масштаб коэффициента усиления.

В частности, если k' и T' изображены в одинаковом логарифмическом масштабе, то $\operatorname{tg} \alpha = 1$ и $\alpha = 45^\circ$.

Допустим, что до охвата звена ПОС имели точку A (на фиг. 5) с координатами k и T . При постепенном возрастании k_n , точка A перемещается вверх по прямой AB и в точках « e » и « f » пересекает уровни запаса устойчивости $c''d''$ и $c'd'$. После пересечения в точке « g » границы устойчивости дальнейшее увеличение k_n не допустимо. Практически же для обеспечения устойчивой работы САР увеличение k_n должно быть приостановлено, не доходя до границы устойчивости.

Если по условиям работы мы должны иметь показатель колебательности, скажем, $M \leq 1,3$, то можем применять неглубокую положительную обратную связь на участке прямой Ae (см. фиг. 5), что соответствует участку кривой ap на фиг. 4. Положительная обратная связь с $k_n = 0 \div 1$ может быть применена правее прямой $A''B''$ (фиг. 5), причем показатель колебательности будет $M \leq 1,3$. Это соответствует участку кривой rs (фиг. 4).

Зона $xyzt$ на фиг. 5 соответствует участку кривой pr (фиг. 4) и является областью, где применение положительной обратной связи невозможно.

В результате проделанного исследования можно заключить, что положительная обратная связь влияет на устойчивость системы и качество переходного процесса по-разному, в зависимости от значения постоянной времени звена, охваченного обратной связью. С целью получения большей устойчивости и лучшего качества переходного процесса ПОС в системе надо охватывать звено с наибольшей постоянной времени. Подобные звенья обычно будут расположены ближе к концу системы автоматизированного электропривода.

3. Для плавного регулирования числа оборотов в больших пределах на практике широко применяются системы генератор-двигатель (Г-Д), подобные ранее рассмотренной. В качестве возбудителей и подвозбудителей в этих системах часто применяются ЭМУ с поперечным полем. Применение же одно- или многоступенчатых ЭМУ с критическим самовозбуждением (рототрол) встречало известные трудности, так как при этом значительно ухудшалась устойчивость системы. Согласно изложенной в разделе 2 теории, положительной обратной связью должен быть охвачен главный генератор, так как его обмотка возбуждения обладает обычно в системе самой большой электромагнитной постоянной времени.

Главный генератор в этом случае должен быть выполнен как одноступенчатый ЭМУ с критическим самовозбуждением (одноступенчатый рототрол), т. е. он должен иметь две обмотки возбуждения: одну управляющую, а другую самовозбуждения (положительная обратная связь). Расчеты и практическое осуществление подобного одноступенчатого рототрола (см. раздел 4) показали, что габариты машины и вес меди обмоток не увеличиваются по сравнению с обычной машиной серийного выпуска. В случае устранения серийной обмотки, которая в данном случае не нужна, так как точность регулирования достигается за счет ПОС, габариты и вес меди обмоток рототрола могут быть даже уменьшены. Конструктивное изменение генератора, таким образом, заключается в разделении обмотки возбуждения на две части.

При охвате главного генератора ПОС, кроме увеличения точности регулирования, значительно улучшаются энергетические показатели системы: увеличивается коэффициент усиления по мощности и уменьшается необходимая мощность управления системы. Последнее обстоятельство позволяет уменьшить мощность и габариты звеньев, предшествующих звену с ПОС, а это в ряде случаев имеет большое значение.

Что же касается устойчивости системы и качества переходного процесса, то при соблюдении неравенства (15) они остаются без существенных изменений. Если, напр., $T_i = \frac{5}{\omega_c}$, то $\varphi = -79^\circ$, а в случае охвата звена ПОС с $k_a = 1$ $\varphi = -90^\circ$. Таким образом, запас устойчивости по фазе уменьшился лишь на -11° .

4. Для подтверждения вышеизложенных теоретических положений автором был произведен эксперимент на системе электропривода постоянного тока по схеме Г-Д, аналогичной изображенной на фиг. 1, с той лишь разницей, что в качестве

возбудителя был ЭМУ с поперечным полем. Эксперимент был поставлен в научно-исследовательской лаборатории кафедры Электрификации промышленных предприятий Ленинградского Электротехнического Института им. В. И. Ульянова (Ленина).

В эксперименте были использованы машины со следующими данными:

Возбудитель — тип ЭМУ—3А, $P_n = 0,2$ квт.

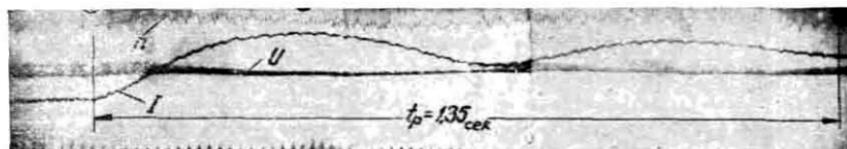
Главный генератор — тип ПН—17,5, $P_n = 3,1$ квт.

Обмотка управления $w_y = 4000 \frac{\text{ВИТКОВ}}{\text{ПОЛЮС}}$.

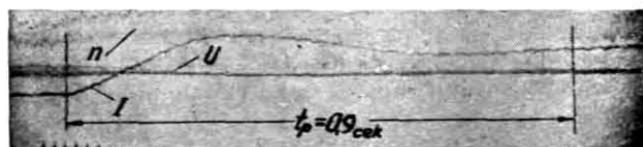
Обмотка самовозбуждения $w_c = 500 \frac{\text{ВИТКОВ}}{\text{ПОЛЮС}}$.

Двигатель — тип ПН-10, $P_n = 0,85$ квт.

Объем настоящей статьи не позволяет сообщить исчерпывающие сведения о постановке и результатах эксперимента. Мы остановимся лишь на одном примере, подтверждающем правильность теоретических выводов. В таблице 1 сведены результаты эксперимента, полученные при набросе номинальной нагрузки двигателя $I_n = 3,75$ а.



а)



б)

Фиг. 6. Осциллограммы наброса нагрузки
а) при $k_n = 1$, б) при $k_n = 0$.

Осциллограммы переходных процессов изображены на фиг. 6.

Как видно из таблицы 1 и фиг. 6, при охвате главного генератора положительной обратной связью время регулирования

возросло лишь в 1,5 раза, а статическая ошибка регулирования уменьшилась в 5 раз.

Таким образом, с помощью ПОС получено значительное повышение точности регулирования. Обстоятельство, что время регулирования увеличилось в 1,5 раза, и несколько больше чем следовало ожидать ухудшилось качество переходного процесса, можно объяснить тем, что в данном случае значения постоянных времени звеньев системы мало отличались друг от друга.

Таблица 1.

№№ п. п.	Наименование величины	Коэффициент положительной обратной связи K_p	
		0	1,0
1.	Мощность управления P_y [вт]	2,48	1,97
2.	Необходимая мощность возбудителя P_a [вт]	18,80	0,76
3.	Число оборотов холостого хода n_0 $\left[\frac{\text{об}}{\text{мин}} \right]$	1000	1000
4.	Число оборотов при номинальной нагрузке n_n $\left[\frac{\text{об}}{\text{мин}} \right]$	960	992
5.	Перепад числа оборотов $\Delta n = n_0 - n_n$ $\left[\frac{\text{об}}{\text{мин}} \right]$	40	8
6.	Время регулирования t_p [сек]	0,90	1,35

Выводы

1. Для исследования влияния положительной обратной связи на устойчивость системы следует пользоваться логарифмическим критерием устойчивости.

2. Исключительно наглядное представление о влиянии ПОС на устойчивость системы и качество переходного процесса дает Д-разбиение по параметрам k и T . Графическое изображение положительной обратной связи следует произвести выше предложенным способом.

3. С точки зрения достижения наибольшей точности регулирования желательно положительной обратной связью охватывать первое звено системы. Таким образом с помощью положительной обратной связи могут быть созданы астатические системы автоматизированного электропривода.

4. Для того, чтобы ПОС заметно не ухудшила устойчивость системы и качество переходного процесса, необходимо ею охватывать звено с наибольшей постоянной времени, так чтобы имело место неравенство (15)

$$T \geq \frac{5}{\omega_c}.$$

В системах Г—Д с применением в качестве отдельных возбудителей генераторов и ЭМУ положительной обратной связи надо охватывать главный генератор.

5. Системы с ПОС имеют большой коэффициент усиления по мощности. Мощность звеньев, предшествующих звену, охваченному ПОС, может быть значительно уменьшена. В рассмотренном примере мощность возбудителя уменьшена в 25 раз (см. табл. 1).

6. Преимущество предложенной системы автоматизированного электропривода с применением положительной обратной связи по напряжению заключается в том, что можем получить большой общий коэффициент усиления по напряжению системы при устойчивой работе без существенного усложнения схемы системы. Габариты и вес меди обмоток отдельных элементов системы также не меняются.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Е. П. Попов, Динамика систем автоматического регулирования, Гостехиздат, М., 1954.
2. А. А. Воронов, Элементы теории автоматического регулирования, Воениздат, М., 1954.
3. А. В. Фатеев, Основы линейной теории автоматического регулирования, Энергоиздат, М.-Л., 1954.
4. В. В. Солодовников (ред.), Основы автоматического регулирования. Теория. Машгиз, М., 1954.
5. К. В. Егоров, Основы автоматического регулирования, Энергоиздат, М.-Л., 1955.
6. М. В. Мееров, Введение в динамику автоматического регулирования электрических машин, Изд. АН СССР, М., 1956.
7. Д. И. Марьяновский, Изменение параметров систем регулирования внутренними связями, Электричество № 2 и 3, 1950.
8. Д. И. Марьяновский, Устойчивость линейных систем автоматического регулирования, Электричество № 9, 1946.
9. А. А. Вавилов, О некоторых особенностях выбора жестких обратных связей в системах автоматического регулирования, Тезисы докладов XII научно-техн. конф. проф.-преп. состава Ленинградского Электротехнического Института им. В. И. Ульянова (Ленина), 1956.

SATURA RĀDĪTĀJS — СОДЕРЖАНИЕ

А. М. Стрекис. Вынужденные колебания системы с одной степенью свободы при наличии силы трения скольжения, зависящей от скорости	7
Е. Б. В а с е р м а н. Обзор способов, дающих двусторонние оценки собственных частот колебаний упругих систем	21
И. И. Катаев. О понятии «точка приложения векторной производной» и применение его в кинематике плоского движения	41
P. J. B ē r z k a l n s. Latvijas mazās dzīvojamās ēkas XVII gadsimtā Малые дома в Латвии в XVII веке	47
A. K. B i r z e n i e k s. Rīgas baroka un klasicisma laikmeta pilsoņu namu fasādes kompozīcijas paņēmieni Приемы композиции фасадов жилых домов Рижского бароко и классицизма.	85
A. K. D u m p i s, V. J. G r ī s l i s. Nestacionara siltuma apmaiņa bimetaliskā termorelejā	109
K. K. T a b a k s. Расчет электрического поля электромагнитного насоса постоянного тока	121
Э. К. Я н к о п. Расчет основных параметров и режима работы линейных индукционных насосов	125
P. D. Ю к н а. Экранирование вертикального заземленного излу- чателя цилиндрическим экраном с торцевым или кольцевым отверстиями	153
Я Я. О с и с. Применение положительной обратной связи в системе автоматизированного электропривода	173