

Г.32 4
И Н С Т И Т У Т
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СОАН С С С Р

ИЯФ 37 - 71

М.Ю.Гельцель

ПОВЫШЕНИЕ НАДЁЖНОСТИ СИСТЕМ ПИТАНИЯ
ИМПУЛЬСНЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ

Новосибирск

1971

Институт ядерной физики

Сибирское отделение Академии наук СССР

М.Ю.Гельцель

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ ПИТАНИЯ
ИМПУЛЬСНЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ

БИБЛИОТЕКА
Института ядерной
Физики СО АН СССР
ИПВ. № _____

Новосибирск

1971г.

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ ПИТАНИЯ ИМПУЛЬСНЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ

А Н Н О Т А Ц И Я

Рассматриваются вопросы повышения надежности работы коммутирующих элементов и конденсаторных накопителей в режиме коммутации больших импульсных токов (сотни килоампер) длительностью ($10^{-2} - 10^{-3}$) сек и частоте повторения (1-50) гц.

Приведены расчётные формулы основных показателей надежности двух систем - системы с ненагруженным резервом и газоразрядными коммутирующими элементами и системы, обладающей структурной избыточностью, где в качестве коммутирующих элементов используются большое число (более 500) полупроводниковых элементов - тиристоров и диодов.

Дана методика инженерного расчёта перегрузочных характеристик силовых полупроводниковых вентиляей.

Приводятся данные о возможности повышения надежности работы конденсаторных накопителей, работающих в схемах с колебательным разрядом ёмкости.

Одной из основных технических проблем при разработке импульсных ускорителей является проблема создания магнитных полей в десятки и сотни килогаусс. Для возбуждения таких магнитных полей в одновитковых магнитных системах необходима коммутация больших импульсных токов (сотни килоампер) длительностью ($10^{-2} - 10^{-3}$) сек. при пиковой мощности в сотни мегавольтампер. Повышение частоты повторения циклов ускорения обуславливает использование схем с рекуперацией энергии, оставшейся после цикла ускорения в нагрузке. Для этой цели целесообразно применять коммутирующие элементы с односторонней проводимостью - вентили.

Создание надежно действующих систем питания импульсных ускорителей определяется, в основном, двумя проблемами - возможностью получения высоких показателей надежности коммутирующих элементов при их работе с максимальным коэффициентом перегрузки по импульсному току и возможностью работы конденсаторных накопителей в режиме периодических импульсов разряда ёмкости в колебательных контурах с небольшим декрементом затухания, когда обратное напряжение на конденсаторах достигает значений, близких к напряжению заряда.

Как показывает анализ статистических данных, собранных за несколько лет работы импульсных систем питания, наибольшую интенсивность отказов дают коммутирующие элементы. В качестве таких элементов могут быть использованы как газоразрядные, так и полупроводниковые вентили.

Рассмотрим основные показатели надежности двух систем, в одной из которых в качестве коммутаторов тока использовались управляемые газоразрядные вентили-игнитроны, а во второй - полупроводниковые управляемые вентили-тиристоры /1/.

Первая система была построена по принципу одновременного разряда 18 групп конденсаторов через такое же число игнитронов на общую нагрузку - магнит ускорителя. При этом ток каждого игнитрона (ИВП 500/5) составлял более 5 ка при длительности синусоидального импульса $\sim 2 \cdot 10^{-3}$ сек. Напряжение на вентиле перед поджигом было равно 2 кв, а обратное напряжение после разряда составляло $\sim 78\%$ от напряжения заряда. Перезаряд накопителя осуществлялся другой группой игнитронов с синхронной подкачкой энергии из сети. Выход из строя одного коммути-

рующего элемента вызывал такое изменение параметров импульса, что требовалось вмешательство обслуживающего персонала. Вследствие этого система всегда должна была иметь ненагруженный скользящий резерв - общий для всех групп. Таким образом в отношении надежности такая система является системой с последовательным соединением элементов и среднее время работы её до отказа определяется не только интенсивностью отказов элементов, а главным образом, скоростью восстановления системы после отказа. Среднее время работы до отказа системы с ненагруженным резервом может быть получено из формулы [2]:

$$T = \frac{1}{k\lambda} \sum_{s=0}^{n-1} \sum_{i=0}^s C_s^i \frac{i!}{(k\mu)^i} \quad \text{или}$$

$$T = \frac{1}{k\lambda} \left\{ 1 + \sum_{i=0}^1 C_1^i \frac{i!}{(k\mu)^i} + \sum_{i=0}^2 C_2^i \frac{i!}{(k\mu)^i} + \dots + \sum_{i=0}^{n-1} C_{n-1}^i \frac{i!}{(k\mu)^i} \right\}$$

Здесь: $n-1$ - количество резервных элементов,

μ - отношение интенсивности отказов λ к интенсивности восстановления M ,

k - количество функционально необходимых элементов.

Зависимость среднего времени работы такой системы до отказа от количества элементов, интенсивности отказов и восстановления показано на рис.1.

Вероятность безотказной работы системы в течение заданного времени t_0 при экспоненциальном законе распределения времени до отказа $P(t_0) = e^{-t_0/T}$ уменьшается с увеличением времени эксплуатации t_0 и повышается с увеличением среднего времени наработки на отказ T . Как видно

из рис.1, увеличение величины T при заданном времени t_0 возможно в данном случае за счёт уменьшения числа вентилях, создания более благоприятных режимов их работы, замены недостаточно надежных типов игнитронов на более надежные и уменьшения времени восстановления после отказа за счёт создания необходимого резервирования групп, своевременной индикации выхода из строя элементов и повышения квалификации обслуживающего персонала.

Вторая система имеет постоянное включение коммутирующих элементов - тиристоров, число которых превышает минимально необходимое для её нормальной работы. Создание определенной избыточности в структуре системы позволяет обходиться без специальных устройств коммутации резервных элементов, а выход из строя определенного числа избыточных элементов не влечет за собой отказа системы. Такое положение существенно упрощает эксплуатацию. Реальная система состоит из двух групп элементов, однако не нарушая общности задачи можно ограничиться рассмотрением одной из них, а вероятность безотказной работы системы вычислить как произведение вероятностей безотказной работы обеих групп.

Каждая группа состоит из ~ 150 элементов соединенных параллельно - последовательно. Надежность определялась для n параллельных ветвей с m последовательно включенными элементами в каждой ветви. Предполагалось, что отказ группы происходит при обрыве любых $(a+1)$ ветвей или при коротком замыкании $(b+1)$ элементов в ветви. Выход из строя любого из этих элементов сопровождается перераспределением нагрузок на остальные элементы. Это значит, что вероятность отказа $q(t)$ зависит от того, когда и сколько вышло из строя элементов группы.

В общем виде вероятность безотказной работы группы из условия обрыва $(a+1)$ ветвей и с учётом увеличения интенсивности отказов при обрыве каждой ветви выглядит следующим образом:

$$P_{\Sigma \text{обр}} = \prod_{l=0}^{a+1} \sum_{i=n-a}^n C_n^i (1 - i m \alpha_l t) (m \alpha_l t)^{n-i}$$

Здесь $\lambda_i = k \lambda_{i-1}$ - интенсивность отказов оставшихся ветвей при отказе одной из ветвей; α - коэффициент, характеризующий отношение числа обрывов элементов ко всем отказам.

Вероятность безотказной работы группы из условия короткого замыкания ($\beta + 1$) элементов в ветви равна:

$$P_{\Sigma k_3} = \prod_{i=1}^{n-\beta} \left[\sum_{k=m-\beta}^m C_m^k (1 - k \beta \lambda_i t) (\beta \lambda_i t)^{m-k} \right]^n$$

Здесь β - коэффициент, характеризующий отношение числа коротких замыканий элементов ко всем повреждениям.

Общая вероятность безотказной работы группы $P_{m,n}(t)$ равна произведению вероятности безотказной работы при условии обрыва ($\alpha + 1$) ветвей на вероятность безотказной работы при условии короткого замыкания ($\beta + 1$) элементов в ветви. Таким образом общее количество избыточных элементов в системе определяется произведением $(\alpha + 1) (\beta + 1) = z$.

Условие, при котором система будет исправна в течение времени - есть $q(t) \leq z$. Таким образом, отыскание вероятности $P_{m,n}(t)$ сводится к вычислению вероятности выполнения этого неравенства. Известно, что интенсивность отказов типовых приборов в значительной степени зависит от коэффициента нагрузки, однако данные об этой зависимости в большинстве случаев в литературе отсутствуют. Использование большого числа полупроводниковых приборов в системах многократного и длительного действия возможно лишь при условии ясного понимания причин выхода их из строя и определения интенсивности отказа тиристоров и диодов при максимально возможном коэффициенте перегрузки их по импульсному току.

Основным параметром, определяющим работоспособность полупроводникового прибора является температура перехода. Повышение ее над предельно допустимой величиной связано с возникновением необратимых процессов, ведущих к выходу прибора из строя. В этом основное отличие полупроводниковых приборов от газоразрядных вентилях. Исходя из этого, основной задачей при исследовании тепловых режимов тиристоров является выяснение функциональной связи между температурой перехода и мощностью, рассеиваемой прибором.

Методика инженерного расчета режимов, обеспечивающих быстрое восстановление электрической прочности и сохранение максимально возможной долговечности приборов, была разработана на основе понятия о тепловом импедансе, представляющем собой временную зависимость температуры на входе прибора в ответ на приложение единичного импульса мощности. Используя третью запись формулы Дюамеля /3/ можно получить функциональную зависимость мгновенной температуры $p-n$ перехода от импульса мощности любой формы и длительности /4/:

$$\Delta \theta(t) = \int_0^t P(x) h'(t-x) dx.$$

В нашем случае для синусоидальной формы тока $i = I_m \sin \omega t$ функция $P(x) = U_0 i(x) + R_g i^2(x)$, где U_0 - пороговое напряжение тиристора (β), R_g - динамическое сопротивление прямой ветви вольтамперной характеристики (ом). Представление заводских характеристик переходных тепловых сопротивлений в виде суммы некоторого числа затухающих экспонент типа $h(t) = \sum_{k=1}^l R_k (1 - e^{-\alpha_k t})$, где

R_k и $1/\alpha_k$ - соответственно, приведенные установившиеся тепловое сопротивление и постоянная времени K -ой области эквивалентной тепловой схемы тиристора, даёт в дальнейшем возможность аналитического решения задачи. Таким образом:

$$h(t-x) = \sum_{k=1}^l R_k [1 - e^{-\alpha_k (t-x)}] \quad \text{и}$$

$$\Delta \theta(t) = \sum_{k=1}^l R_k \alpha_k e^{-\alpha_k t} \int_0^t P(x) e^{\alpha_k x} dx$$

$$\text{Функция } P(x) = I_m \sin \omega x + I_m^2 R_g \sin^2 \omega x$$

может быть представлена в виде:

$$P(x) = U_0 I_m \sin \omega x + R_g I_m^2 / 2 - R_g I_m^2 \cos 2\omega x / 2$$

т.к. $\sin^2 \omega x = 1 - \cos 2\omega x / 2$ и тогда:

$$\Delta \theta(t) = \sum_{k=1}^{\ell} R_k \alpha_k e^{-\alpha_k t} \int_0^t (U_0 I_m e^{\alpha_k x} \sin \omega x + R_g I_m^2 e^{\alpha_k x} / 2 - R_g I_m^2 e^{\alpha_k x} \cos 2\omega x / 2) dx.$$

Решение такого интеграла при переменном верхнем пределе интегрирования даёт следующую зависимость температуры перехода от параметров импульса и переходных тепловых характеристик данного прибора:

$$\Delta \theta(t) = \sum_{k=1}^{\ell} R_k \left\{ \frac{U_0 I_m \alpha_k}{\omega^2 + \alpha_k^2} [\omega (e^{-\alpha_k t} - \cos \omega t) + \alpha_k \sin \omega t] + \frac{R_g I_m^2}{2} (1 - e^{-\alpha_k t}) - \frac{R_g I_m^2}{2} \frac{\alpha_k}{4\omega^2 + \alpha_k^2} [\alpha_k (\cos 2\omega t - e^{-\alpha_k t}) + 2\omega \sin 2\omega t] \right\}$$

В конце импульса при $t = \pi / \omega = \tau$:

$$\Delta \theta(t) = \sum_{k=1}^{\ell} R_k \left\{ \frac{U_0 I_m \alpha_k \omega}{\omega^2 + \alpha_k^2} (1 + e^{-\alpha_k \tau}) + \frac{R_g I_m^2}{2} (1 - e^{-\alpha_k \tau}) - \frac{R_g I_m^2 \alpha_k^2}{2(4\omega^2 + \alpha_k^2)} (1 - e^{-\alpha_k \tau}) \right\}$$

Для тиристоров ВКДУ-150 характеристика переходных тепловых сопротивлений может быть представлена в виде:

$$h(t) = 16 \cdot 10^{-2} (1 - e^{-500t}) + 6 \cdot 10^{-2} (1 - e^{-10t}) + 9 \cdot 10^{-2} (1 - e^{-0,56t}) + 14,5 \cdot 10^{-2} (1 - e^{-9,04t}) + 90 \cdot 10^{-2} (1 - e^{-9,001t})$$

При длительности импульсов ($10^{-2} \div 10^3$) сек основную роль играют первые два члена разложения и расчётная формула может быть упрощена. Исследуя функцию $\Delta \theta(t)$ на экстремум в зависимости от длительности импульса и величины тока можно получить не только момент времени, при котором $d\theta/dt = 0$ и, следовательно, $\Delta \theta = \Delta \theta_{max}$, но и сдвиг по фазе от максимума функции $P(t)$, вызывающей нагрев прибора.

Как видно из рис. 2а запаздывание по фазе максимума температуры от максимума мощности (тока) увеличивается с уменьшением длительности импульса и для $\tau = 10^{-3}$ сек близко к $\pi/2$. При увеличении длительности импульса запаздывание по фазе уменьшается и при $\tau = 50 \cdot 10^{-3}$ сек весьма мало (-8°). Для импульса длительности 10^2 сек это запаздывание составляет $\sim \pi/4$, т.е. $\Delta \theta = \Delta \theta_{max}$ спустя $3/4 \pi$ ($\sim 7,5$ мсек) от начала импульса тока.

При отсутствии переходных тепловых характеристик прибора для определения температуры $p-n$ перехода при перегрузочных режимах может быть использована методика расчёта, основанная на решении уравнений теплового баланса относительно конечной температуры. Разбивая длительность импульса на n одинаковых отрезков времени и используя метод конечных приращений, получим общую формулу для определения температуры на каждом отрезке времени:

$$\Delta \theta(T_{n+1}) = \frac{0,239 \Delta T P(T_n, T_{n+1}) + A_1 \theta(T_n) + A_2 \Delta T \theta_0}{A_1 + A_2 \Delta T}$$

Здесь: $-P(T_n, T_{n+1})$ - среднее значение мощности на отрезке времени от T_n до T_{n+1} ;

- A_1 [кал/град] - коэф., характеризующий нагрев пластины кремния за выбранный отрезок времени;

- A_2 [кал/град.сек] - коэф., характеризующий передачу тепла через термокомпенсаторы и нагрев кольцевой зоны кремниевой пластины у сплавных переходов;

θ_0 [град] - начальная температура при одиночных импульсах или средняя температура при периодически повторяющихся импульсах перегрузки.

Исходя из геометрии данного типа вентиля можно определить коэф. A_1 и A_2 и тем самым получить расчётные формулы, позволяющие установить функциональную связь между температурой $p-n$ перехода и мощностью импульса любой формы и длительности. Такие формулы даны в таблице 1.

На рис.26 показана зависимость температуры $\Delta\theta(t)$ для тиристоров Т-150 (ВКДУ-150) и ТТ-200 от длительности и мощности импульса. Пунктирные кривые 2 получены при расчёте методом конечных приращений, когда $\Delta T = 0,1 T$, а кривые 1 получены при расчёте с использованием переходных тепловых характеристик. Как видно из рисунка результаты, полученные при расчёте обоими методами для одной и той же длительности импульса близки друг к другу. Сходимость результатов тем лучше, чем меньше выбранный отрезок времени ΔT .

Как показано в работе /5/, при импульсных токовых воздействиях в пластине кремния возникают значительные термонапряжения. При превышении предела прочности кремния пластина может разрушаться. В диапазоне длительностей синусоидального импульса $(10^{-3} - 10^{-2})$ сек, токовые перегрузки приводят к возникновению сжимающих усилий. Критические токи, соответствующие $[G_{сж}]_{кр} = 6,8$ кг/мм даны на рис.3. Критические термонапряжения возникают в момент максимума функции $\Delta\theta(t)$, т.е. со сдвигом по фазе от P_{max} . Если значение критических токов поставить в выражение для $\Delta\theta(t)$, то расчётная максимальная температура составляет $250 + 300^\circ$, что близко к результатам работы /5/. Таким образом, при одиночных импульсах ток перегрузки должен быть меньше критического тока, определяемого максимумом мгновенной температуры $p-n$ перехода и, как следствие предельно-допустимыми сжимающими усилиями.

При увеличении частоты повторения импульсов определяющей становится температура к моменту приложения повторного импульса, а предельная температура перехода будет равна сумме двух составляющих - мгновенной температуры $\Delta\theta_{max}$ и средней температуры $\Delta\theta_0$. Таким образом максимальная температура перехода в момент импульса θ_{Σ} должна быть меньше $\Delta\theta_{max} + \Delta\theta_0 \approx 250^\circ$.

Критические токи, при которых постоянная составляющая температуры равна предельно допустимой $\Delta\theta_0 \approx 120^\circ$, могут быть найдены из выражения:

$$I_{кр(\omega)} = -\frac{U_0}{2Rg} + \sqrt{\frac{U_0^2}{4Rg^2} + \frac{P_{кр(\omega)}}{Rg}},$$

где

$$P_{кр(\omega)} = \frac{\Delta\theta_{гор}}{\sum_{k=1}^{\infty} R_k (1 - e^{-d_k \tau} / 1 - e^{-d_k T})}$$

Здесь $\tau = \pi/\omega$, $T = 1/f$, а $I_0 = 0,637 I_m$ в случае синусоидального импульса и

$$I_0 = I_m / \tau \left(\int_0^{\pi/2\omega} \sin \omega_0 t + \int_{\pi/2\omega}^{t_n} \sin \omega t \right)$$

в схемах с перехватом тока. Для квазисинусоидальной формы импульса время перехвата

$$t_n = \frac{1}{\omega_n} \arcsin U_c \sqrt{C/Ln} / I_m$$

определяется параметрами контура перехвата L_n и C . В этом случае постоянная составляющая меньше, чем в случае синусоидального импульса, что позволяет при одной и той же допустимой температуре $\Delta \theta_0$ иметь большие значения критических токов I_m . Перегрузочные характеристики тиристоры типа ВКДУ-150 (Т-150) в зависимости от длительности импульсов τ и частоты повторения f даны на рис.3. В таблице 2 даны значения коэффициента

$$n = \sum_{k=1}^k R_k (1 - e^{-\alpha_k \tau}) / (1 - e^{-\alpha_k T})$$

как функции от f и τ . Коэффициент перегрузки вентиляй

по мощности $k_p = \sum R_k / n$, где

$$\sum_{k=1}^k R_k = \begin{cases} 1,23 & \text{без охлаждения} \\ 0,4 & \text{с охлаждением воздухом.} \end{cases}$$

Постоянная составляющая температуры для импульса синусоидальной формы может быть определена из выражения:

$$\Delta \theta_0 = n [0,637 I_m (U_0 + 0,637 I_m R_g)]$$

где n берется из таблицы 2, а R_g определяется из вольт-амперных характеристик или справочно-каталожных данных. При уменьшении динамического сопротивления R_g величина критических токов, как видно из выражения для $\Delta \theta_0$ и $\Delta \theta(t)$, резко возрастает. Однако величина максимально возможного тока перегрузки ограничивается не только температурой перехода, но и "шнурованием" прямого тока. Согласно работе /6/ "шнурова-

ние" тока происходит из-за наличия участка отрицательного сопротивления на импульсной вольт-амперной характеристике (так называемая S -образность характеристики). Происходит локальное расплавление структуры и прибор выходит из строя по короткому замыканию. Область критических токов шнурования при изменении переходного сопротивления между кремниевой пластиной и вольфрамовым компенсатором в пределах $(0,1 - 0,5) \cdot 10^{-3} \text{ ом} \cdot \text{см}^2$ дана на рис.3. При большом разбросе величины этого сопротивления, что практически весьма вероятно, и величинах токов, попадающих в эту область, интенсивность отказов при приработке приборов значительно увеличивается. Таким образом это явление резко ограничивает перегрузочные способности полупроводниковых вентиляй. Увеличение площади пластины в тиристорах типа ТТ даёт возможность при плотности тока, не превышающей предельно допустимой, получить значительно большие токи перегрузки и тем самым уменьшить число вентиляй.

Исходя из расчётных данных были выбраны допустимые коэффициенты перегрузки для разных режимов работы тиристоры. Путем обработки статистических данных, полученных в ходе испытаний, были определены величина интенсивности отказов λ_{cm} и коэффициенты α и β , характеризующие надежность работы элементов в выбранном режиме.

В нашем случае испытания проводились на действующей системе, поэтому в процессе работы вышедшие из строя элементы заменялись новыми. Длительность испытаний заранее не планировалась и испытания проводились до момента отказа m -го элемента t_0 . При экспоненциальном распределении длительности работы каждого элемента от начала испытаний до m -го отказа средняя наработка элементов на отказ равна:

$$T_{cm} = \frac{N t_0}{m}, \quad \alpha \lambda_{cm} = \frac{m}{N t_0}$$

При $m = 4$, $t_0 = 10^3$ часов и $N = 150$ статистическая интенсивность отказов λ_{cm} составляла $\sim 2,7 \cdot 10^{-5}$ 1/час.

Поскольку обработка ограниченного по объёму статистического материала не даёт возможности определить фактическое значение среднего времени наработки на отказ, то определялся диапазон, в пределах которого лежит искомая величина. Для расчётов же использовалась верхняя (максимальная) граница ин-

тенсивности отказов λ с необходимым для данного случая коэффициентом доверия. В случае экспоненциального распределения отказов верхняя граница интенсивности отказов $\lambda = \lambda_{ст} Z_n$ где коэффициент Z_n брался из таблицы "Коэффициенты для определения доверительных границ в случае экспоненциального и гамма-распределения". Этот коэффициент является функцией числа отказов m и коэффициента доверия α , и в нашем случае $Z_n = 0,64$, а $\lambda \sim 4 \cdot 10^{-5}$ 1/час. При выходе из строя любого элемента относительная интенсивность отказов увеличивается и требуется знание зависимости $\lambda = \varphi_1(K_n)$ или $\lambda = \varphi_2(\Delta \theta)$. Такая примерная зависимость может быть получена из формулы для циклоустойкости тиристоров с учётом изменения температуры перехода от изменения тока нагрузки.

Для упрощения расчётов было принято, что $\lambda_{n+1} = \lambda_n K_n^{\beta}$ где $K_n = I_{n+1} / I_n$ и $\beta = 3 \div 4$. Зависимость вероятности безотказной работы системы с избыточной структурой от количества элементов и интенсивности их отказов дана на рис.4.

На рис.5 дана зависимость времени работы системы от вероятности отказа, количества элементов и интенсивности отказов при переходе от n параллельных ветвей к $n-1$, $n-2$ и т.д. ветвей при последовательном выходе их из строя. Для сравнения даны аналогичные расчётные зависимости для тиристоров типа ТТ-200. Отношение числа коротких замыканий β к числу обрывов α принято ~ 20 , т.е. рабочие токи перегрузки определяются, в основном, предельно-допустимой плотностью прямого тока и локальным расплавлением структуры, приводящей к короткому замыканию вентиля. Наличие дросселей насыщения уменьшает коммутационные потери при включении, а снятие обратного напряжения уменьшает эти потери при выключении. При скорости распространения тока по структуре $\sim 0,1$ мм/мксек необходимое время нарастания тока в импульсе составляет для ВКДУ-150 (Т-150) $\sim 100-140$ мксек.

Работа конденсаторных накопителей в колебательных контурах вызывает увеличение интенсивности отказов элементов за счёт увеличения напряжённости электрического поля в диэлектрике. Допустимая напряжённость $E_{раб}$ - есть функция суммарной

напряжённости в разрядном режиме конденсатора и зависит от декремента затухания контура.

При добротности контура $\gg 40$ обратное напряжение на конденсаторах почти равно напряжению заряда и суммарная напряжённость E_{m-m} почти вдвое больше номинальной напряжённости в диэлектрике. Рядом исследований установлено, что основной причиной пробоя диэлектрика в импульсном режиме являются частичные разряды, количество которых является функцией напряжённости E_{m-m} . В работе /7/ приведены данные о зависимости числа разрядов конденсаторов от напряжения зарядки и от соотношения обратного напряжения $U_{обр}$ к напряжению зарядки U_m (рис.6). Срок службы конденсаторов

$Z = A_1 E_{m-m}^{-\rho}$, где $\rho = 6 \div 10$ и зависит от типа диэлектрика. Таким образом уменьшение интенсивности отказов конденсаторов, работающих в импульсном режиме, зависит главным образом от возможности уменьшения напряжения зарядки и обратного напряжения после разряда.

Наибольшие возможности в этом отношении дают схемы, позволяющие получить однополярный режим работы накопителя по напряжению /1, 8/. Использование в цепях перехвата неуправляемых вентилях с нелинейными индуктивностями позволяет уменьшить вдвое количество тиристоров и обеспечить при этом высокую надёжность работы схемы (рис.7).

При параллельном соединении n конденсаторов вероятность безотказной работы накопителя в целом будет определяться, в основном, короткими замыканиями и коэффициент β можно принять ~ 1 , тогда $P(t) = (1 - \lambda_i t)^n$, где

λ_i - интенсивность отказов как функция суммарной напряжённости E_{m-m} , т.е. $\lambda_i = A_2 E_{m-m}^{-\rho}$. В лучшем случае, когда обратное напряжение на конденсаторе снято полностью, интенсивность отказов каждого элемента уменьшится \sim в 10 раз. Для накопителя, состоящего из 300 элементов, вероятность безотказной работы его в течение заданного времени увеличится, как показывают расчёты (рис.6) более чем в 15 раз, что позволяет увеличить частоту повторения импульсов или при той же частоте повторения значительно увеличить надёжность работы накопителей.

В ы в о д ы

1. Повышение надежности систем питания импульсных ускорителей зависит, главным образом, от повышения вероятности безотказной работы коммутирующих элементов и конденсаторных накопителей.

Наиболее технически целесообразным и экономически выгодным в этом отношении следует считать использование однополярного режима работы по току в индуктивности нагрузки и напряжению на ёмкости накопителя. Такой режим позволяет обеспечить за счёт значительного уменьшения обратного напряжения благоприятные условия работы как для коммутирующих элементов, так и для накопителя. Кроме того, возможность уменьшения количества управляемых вентилях в этом случае увеличивает надежность работы таких схем.

2. Система, обладающая определенной структурной избыточностью позволяет уменьшить среднее время восстановления после отказа и не требует высокой квалификации обслуживающего персонала. Это даёт возможность при одинаковых коэффициентах стоимости эксплуатации иметь в этом случае более высокий коэффициент готовности системы.

3. Использование в системе полупроводниковых элементов с интенсивностью отказов на 2-3 порядка меньшей, чем у газоразрядных приборов, позволяет получать высокие показатели надежности всей системы, несмотря на большее количество элементов (~ 500). Однако при таком количестве элементов, имеющих большие среднеквадратичные отклонения времени безотказной работы от их среднего значения, очень трудно разграничить период нормальной эксплуатации от периода старения, что снижает вероятность безотказной работы системы в целом. Для повышения степени однородности элементов следует производить предварительный отбор элементов в процессе их тренировки.

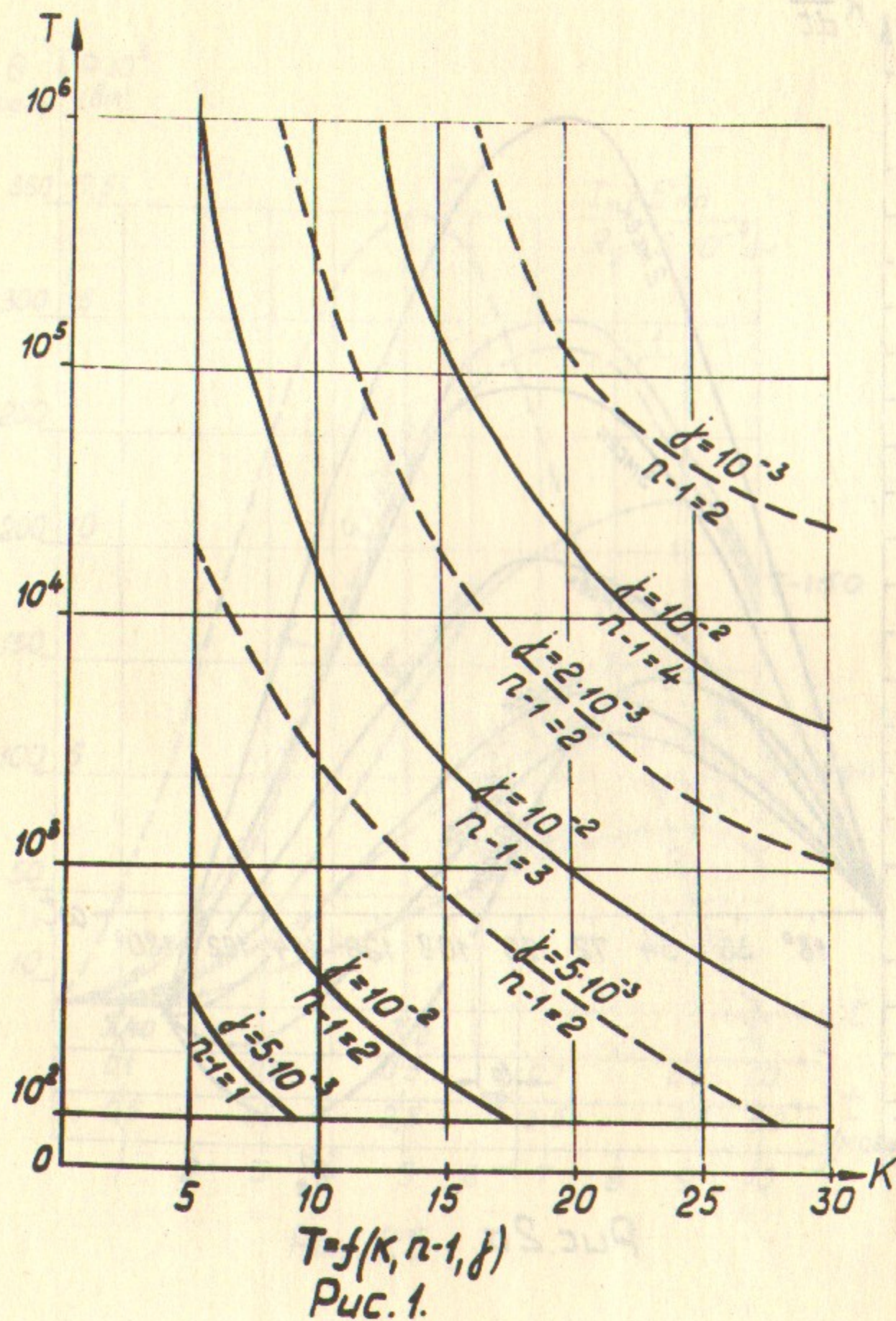
Для уменьшения числа коммутирующих элементов, необходимо использовать новые разработки тиристоров типа ТТ, имеющих лучшие перегрузочные характеристики.

Таблица 1	
$\Delta\theta(\Delta T_{n+1})$ [град]	Расчетные формулы
Т-150 (ВКДУ-150)	$\frac{239 \cdot 10^{-3} P_{cp}(\Delta T_n, \Delta T_{n+1}) \Delta T + 0,026 \Delta \theta(\Delta T_n) + 11 \Delta T \Delta \theta_0}{0,026 + 11 \Delta T}$
ТТ-200	$\frac{239 \cdot 10^{-3} P_{cp}(\Delta T_n, \Delta T_{n+1}) \Delta T + 0,11 \Delta \theta(\Delta T_n) + 46,3 \Delta T \Delta \theta_0}{0,11 + 46,3 \Delta T}$
ВК-200	$\frac{239 \cdot 10^{-3} P_{cp}(\Delta T_n, \Delta T_{n+1}) \Delta T + 0,0448 \Delta \theta(\Delta T_n) + 18,5 \Delta T \Delta \theta_0}{0,0448 + 18,5 \Delta T}$
ВК-2-200 ВК-4-200	$\frac{239 \cdot 10^{-3} P_{cp}(\Delta T_n, \Delta T_{n+1}) \Delta T + 0,07 \Delta \theta(\Delta T_n) + 21,3 \Delta T \Delta \theta_0}{0,07 + 21,3 \Delta T}$
	*) Расчетные формулы получены в [9]

Таблица 2.

$n \cdot 10^{-3}$ [град./ватт]

f	Длительность импульса τ (мсек)													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	20	30	40	50
1	7,32	12,0	15,6	17,5	19,7	21,5	22,5	24,0	25,0	26,1	35,2	41,6	50,0	57,5
2	7,34	12,3	16,0	18,5	20,5	22,0	23,5	25,0	26,0	27,5	36,5	44,5	53,5	62,0
3	7,36	12,6	16,5	19,5	21,0	23,0	24,5	26,5	27,5	29,0	41,0	48,0	57,5	67,5
4	7,38	12,8	17,0	20,5	22,0	24,0	25,5	27,5	28,5	30,5	42,5	51,5	62,0	72,0
5	7,40	13,0	17,5	21,5	22,4	25,0	26,5	28,6	30,0	31,3	43,0	55,5	67,0	78,5
6	7,50	13,5	18,0	22,0	23,0	26,0	27,5	30,0	31,5	33,5	46,5	59,5	71,5	85,0
7	7,60	14,0	18,5	22,5	24,0	27,0	29,0	31,5	33,0	35,0	48,5	64,0	76,0	89,0
8	7,70	14,5	19,0	23,0	25,0	28,0	30,5	33,0	35,0	37,0	52,5	68,5	81,0	97,5
9	7,80	15,0	19,5	23,5	25,8	29,0	31,5	34,5	36,5	38,0	56,0	72,5	85,5	102,5
10	8,00	15,6	19,9	24,0	26,5	30,0	33,0	35,5	37,5	39,2	59,5	75,3	92,0	106,0
20	8,80	18,5	26,2	31,5	36,3	41,5	46,5	51,0	55,0	59,0	91,0	126,5	159,0	193,5
30	9,60	21,0	31,5	39,0	45,6	53,0	59,0	65	77,5	87,4	124,0	176,0	222,0	272,0
40	10,4	25,0	37,5	48,5	57,0	68,0	78,5	87,0	95,0	103,0	157,0	226,5	286,0	346,5
50	11,5	29,0	44,5	56,0	67,2	79,5	90,0	100,0	109,0	117,0	191,0	274,0	352,0	430,0



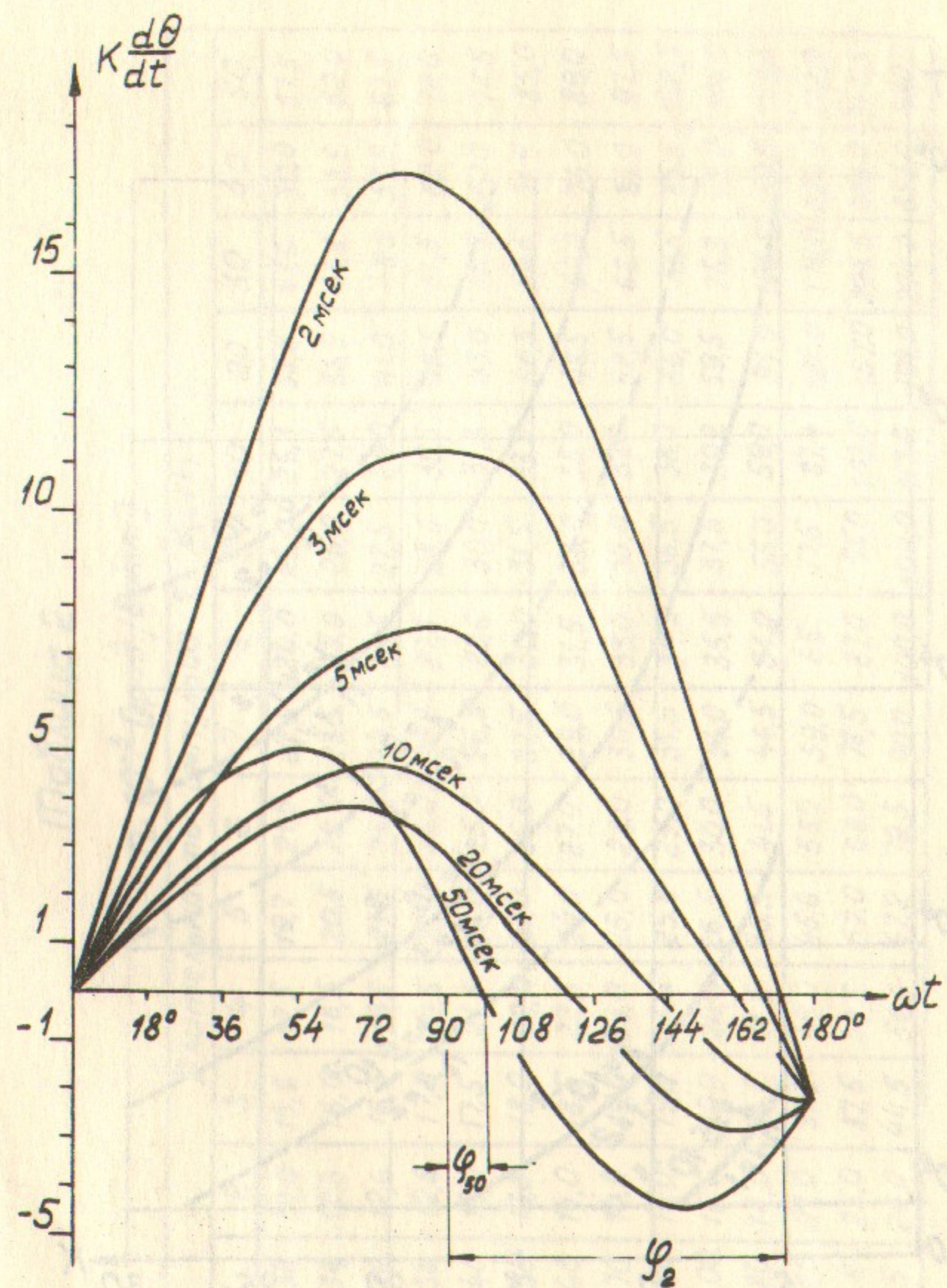


Рис. 2а.

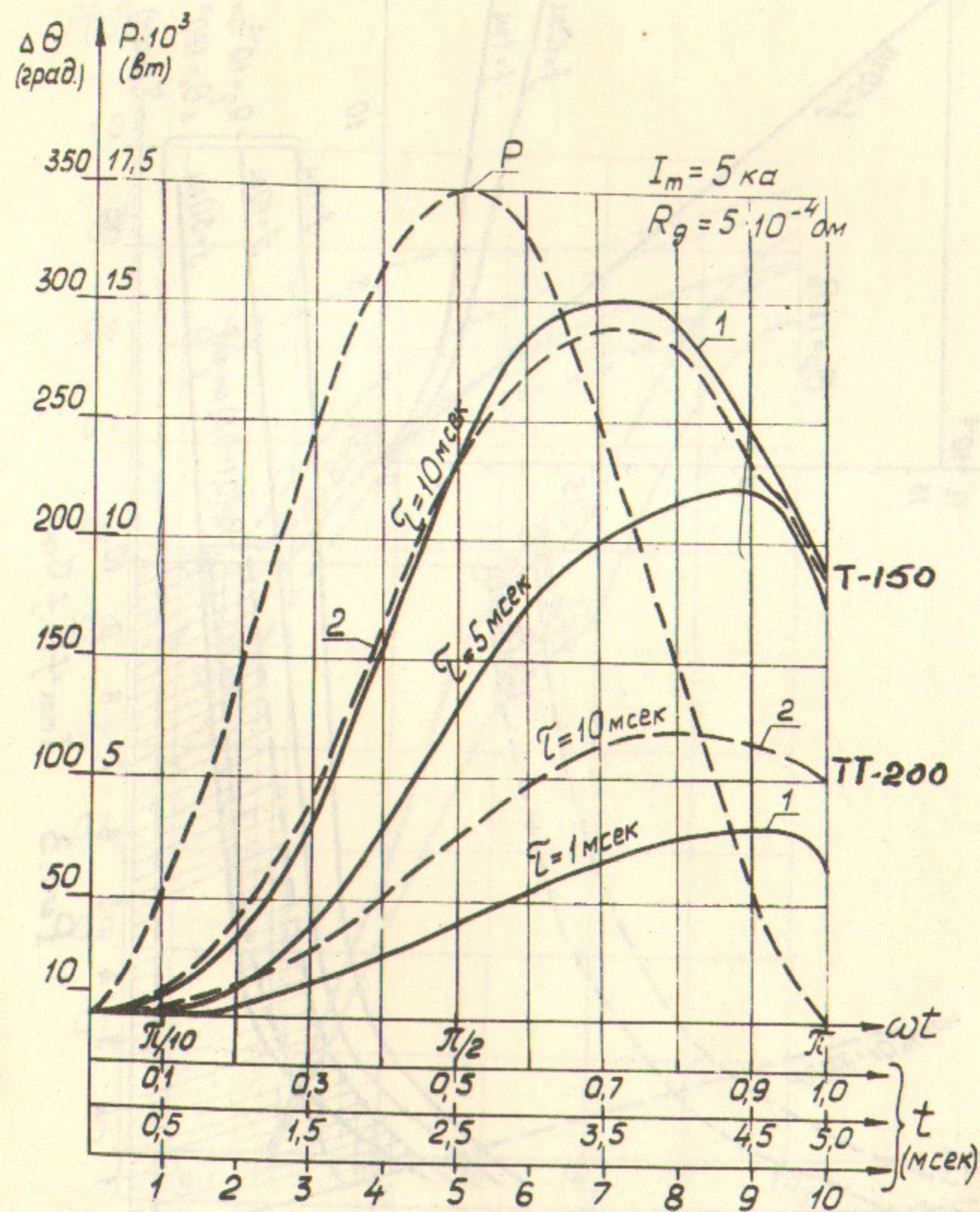


Рис. 2б.

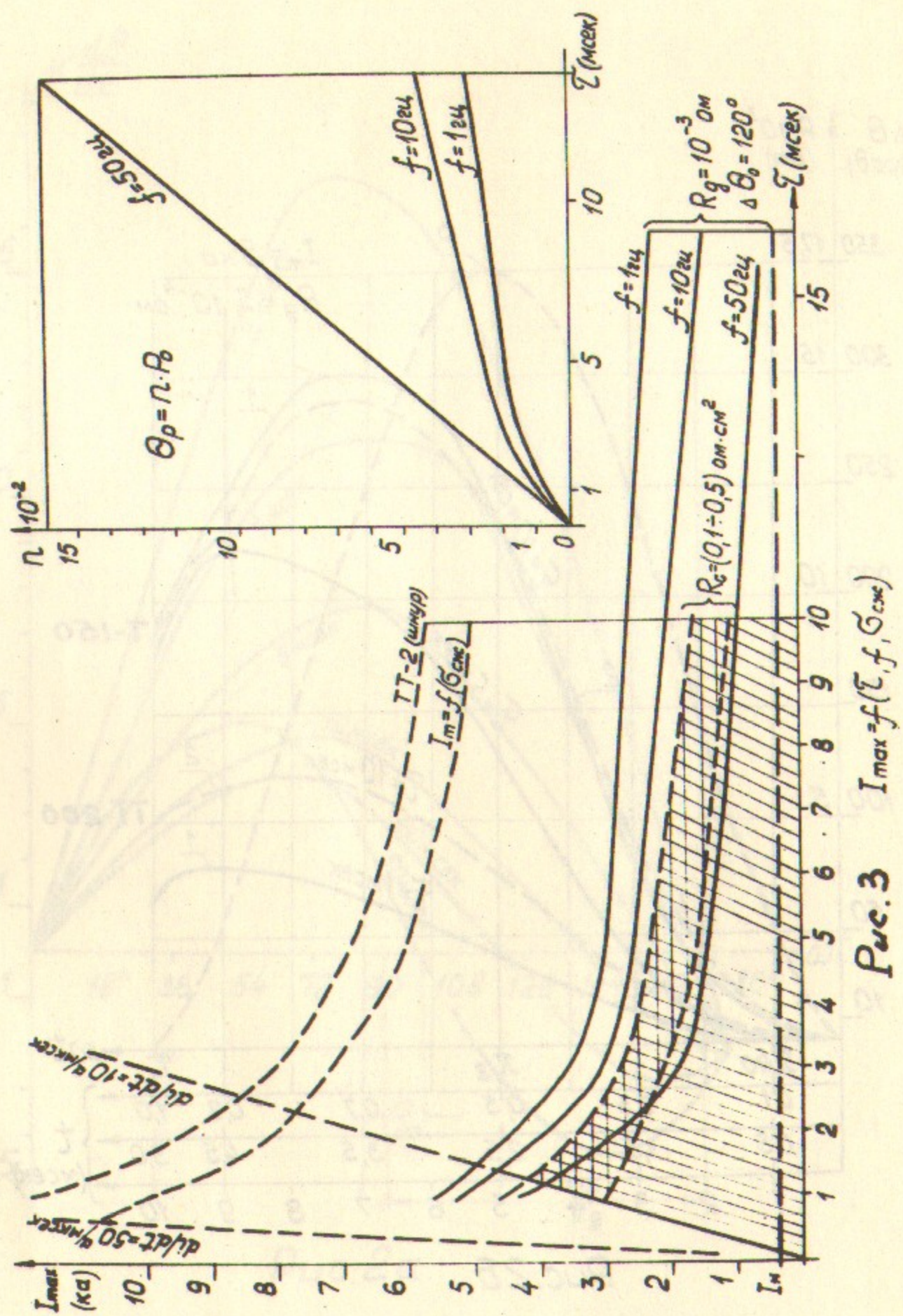


Рис. 3

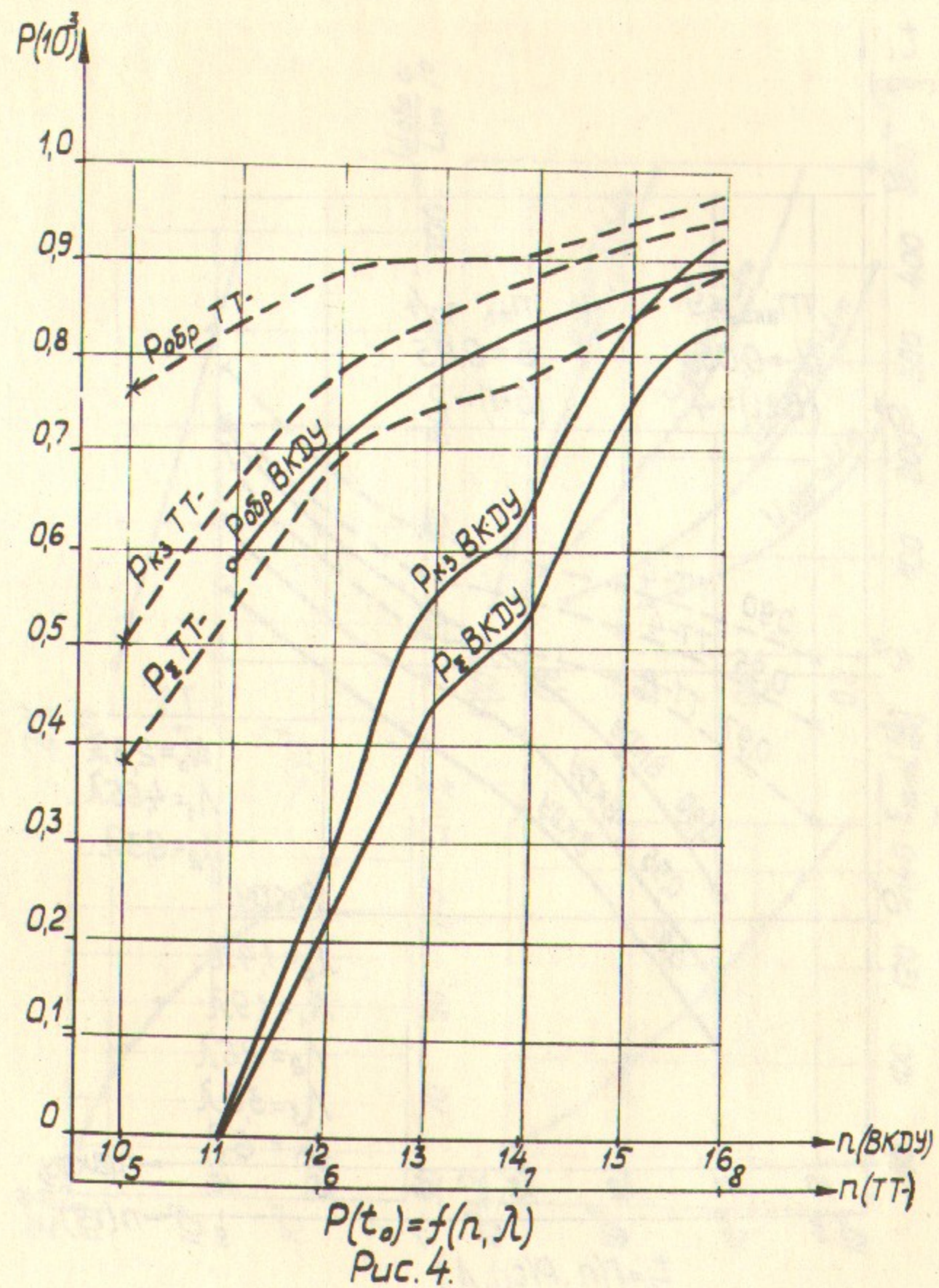
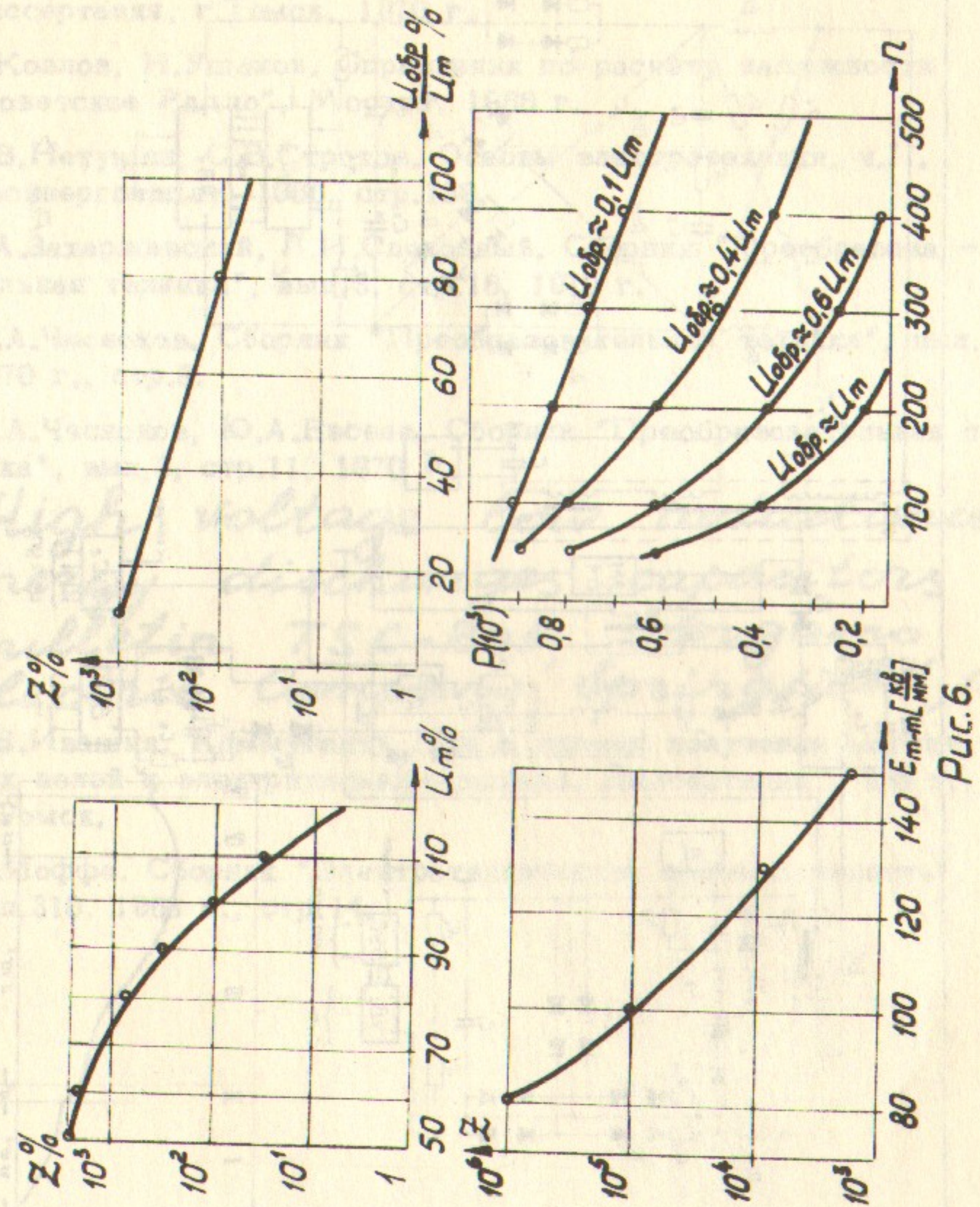
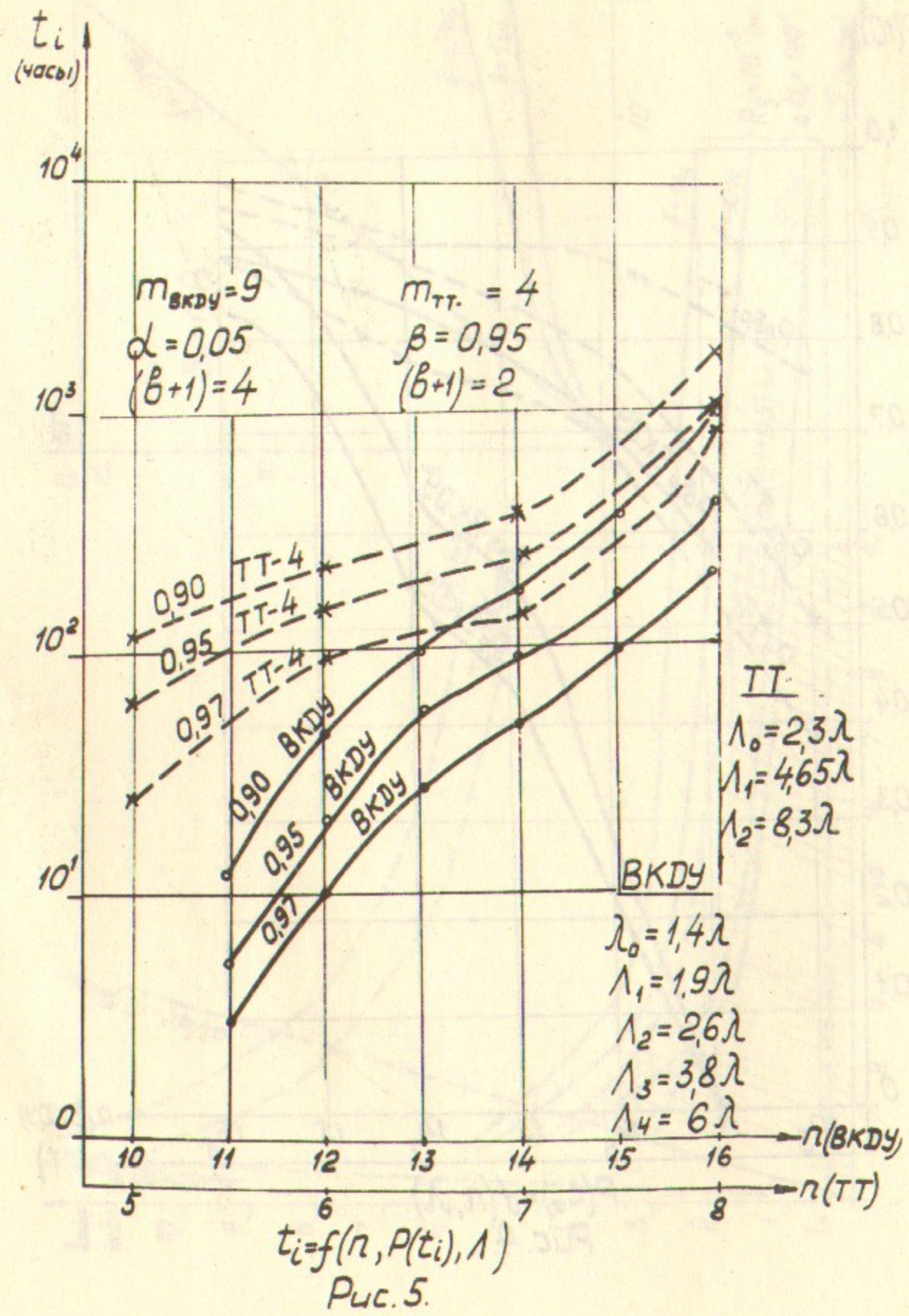
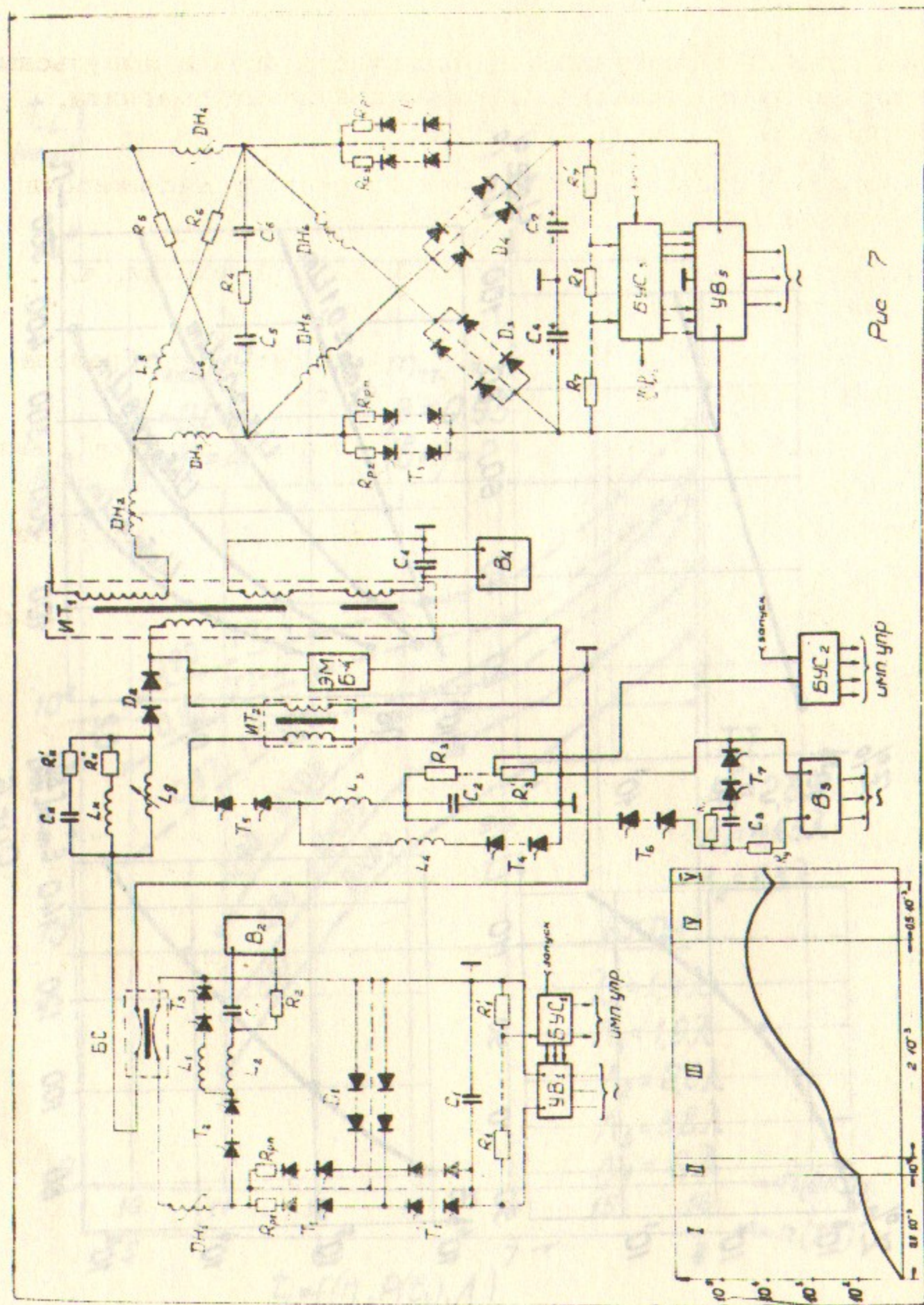


Рис. 4





Л и т е р а т у р а

1. М.Ю.Гельцель. Возбуждение магнитного поля в импульсных синхротронах с одновитковой обмоткой электромагнита. Диссертация, г.Томск, 1970 г.
2. Б.Козлов, Н.Ушаков. Справочник по расчёту надёжности "Советское Радио", Москва, 1966 г.
3. А.В.Нетушин, С.В.Страхов. Основы электротехники, ч.II. Госэнергоиздат, 1955, стр.139.
4. О.А.Захаржевский, Л.И.Спокойный. Сборник "Преобразовательная техника", вып.3, стр.16, 1970 г.
5. Ю.А.Чесноков. Сборник "Преобразовательная техника", вып.2, 1970 г., стр.8.
6. Ю.А.Чесноков, Ю.А.Евсеев. Сборник "Преобразовательная техника", вып.3, стр.11, 1970 г.
7. *High voltage low inductance energy discharge capacitors Bulletin TSC-201, Sangamo Electric Company, Springfield, 1962.*
8. В.В.Ивашин. Коммутация тока в схемах получения магнитных полей и электрических машинах. Диссертация, 1968 г., г.Томск.
9. Ю.Иоффе. Сборник "Электротехническая промышленность", вып.310, 1968 г., стр.14.

Подписи к рисункам

Рис.1. Зависимость среднего времени T работы системы с ненагруженным резервом до отказа от количества электронов K , интенсивности их отказов λ [1/час] и интенсивности восстановления μ [1/час].

Рис.2а. Зависимость угла запаздывания максимума функции $\theta(t)$ от максимума функции $P(t)$ при различных длительностях импульса.

Рис.2б. Зависимость мгновенной температуры p - n перехода тиристоров $\Delta \theta(t)$ от мощности $P(t)$ для синусоидального импульса тока различной длительности.

Рис.3. Перегрузочные характеристики тиристоров в зависимости от длительности импульсов τ / мсек / и частоты повторения f / герц /.

Рис.4. Зависимость вероятности безотказной работы коммутирующих элементов $P(t)$ в системе со структурной избыточностью от количества элементов n и интенсивности их отказов λ .

Рис.5. Зависимость времени работы коммутирующих элементов (тиристоров) t_0 от вероятности их безотказной работы $P(t)$ в системе со структурной избыточностью.

Рис.6. Зависимость срока службы конденсаторов в импульсном режиме Z от напряжения заряда U_m , обратного напряжения $U_{обр}$ и напряженности поля в диэлектрике $E_{m-m} / 7$. Зависимость вероятности безотказной работы накопителя для $t_0 = 10^3$ часов $P(10^3)$ от количества конденсаторов в накопителе n и обратного напряжения $U_{обр}$.

Рис.7. Система питания синхротрона Б-4 с использованием полупроводниковых коммутирующих элементов.

Ответственный за выпуск М.Ю.Гельцель
Подписано к печати 9.6.71 МНО2675
Усл. 1,1 печ.л., тираж 150 экз. Бесплатно.
Заказ № 37 . ПРЕПРИНТ
Отпечатано на ротапринте в ИЯФ СО АН СССР, нв.