

CONTROL DE REACTORES MEDIANTE EXCITACIONES
EXTERNAS DE REACTIVIDAD

J. PORTO; M. GOLDSTEIN - Dirección PROYECTOS, Gerencia DISEÑO-C.N.E.A.

Introducción:

La respuesta en frecuencia de un reactor nuclear, frente a pequeñas excitaciones externas de reactividad, muestra un comportamiento analítico variable con el cambio del valor medio de la reactividad.

Esto permite inferir que la medición de la función transferencia a distintas frecuencias, mientras el sistema evolucione lentamente, conduce a la determinación del valor de la reactividad en cada instante, y como consecuencia de ello, al control de aproximación a crítico y de estado crítico del sistema.

La experiencia fue ensayada mediante la simulación electrónica del reactor RA-2, existiendo con una reactividad senoidal y modulada en frecuencia, seleccionando el par de límites más adecuado de acuerdo con los parámetros del reactor, obteniéndose datos y curvas que confirman la hipótesis.

El mecanismo para excitar al reactor se basa en el empleo de un L.V.D.T. (transformador diferencial de posición) que permite controlar con precisión suficiente la excitación de reactividad, tanto en frecuencia como en amplitud.

La información obtenida de la variación del flujo neutrónico permite determinar el estado dinámico del reactor y en cada instante corregir la evolución del mismo, según los requerimientos de cada caso.

El sistema electrónico también permite determinar el valor del período en tiempos cortos comparados con el tiempo de evolución del sistema, para cada valor de reactividad media.

La excitación de un reactor nuclear con una señal de reactividad dada por $\rho(t)$, produce una respuesta $n(t)$ tal que la función de transferencia del sistema está definida por:

$$T(j\omega) = \frac{n(j\omega)}{\rho(j\omega)} \quad (1)$$

donde $n(j\omega)$ es la densidad espectral de la población neutrónica y $\rho(j\omega)$ la de la señal externa (reactividad).

La forma analítica de la $T(j\omega)$ depende del estado del reactor: la distribución espectral de su amplitud no tiene el mismo comportamiento cuando se cambia dicho estado dinámico, notándose, por ejemplo, que su amplitud a bajas frecuencias no conserva una relación constante con la amplitud a altas frecuencias.

La forma explícita de la expresión (1), es decir, $T(j\omega)$ en función de la frecuencia angular ω , de la reactividad ρ y de los parámetros del reactor, se puede deducir usando las ecuaciones cinéticas de un modelo puntual, para condiciones dinámicas "cuasi-estables" del reactor, o sea, para evoluciones lentas.

Las ecuaciones cinéticas para un modelo de reactor puntual, donde el índice i representa a cada grupo de neutrones retardados y k al factor multiplicativo son:

$$N(t) = \frac{(1 - \beta) k - 1}{1} N(t) + \sum \lambda_i C_i(t)$$

$$C_i(t) = -\lambda_i C_i(t) + \frac{\beta i k}{1} N(t)$$

La reactividad fraccional ρ está definida por:

$$\rho = \frac{k - 1}{k}$$

Entonces para que esta reactividad aparezca en las ecuaciones, para la primera de éstas escribimos:

$$(1 - \beta) k - 1 = (1 - \beta) k + (1 - \beta) - (1 - \beta) - 1 = (k - 1) \quad (1 - \beta) - \beta$$

Como trabajamos en este caso para un entorno del estado crítico, podemos escribir $k \approx 1$, luego

$$(1 - \beta) k = \rho(1 - \beta) - \beta$$

para la segunda de las ecuaciones cinéticas escribimos

$$k = \rho k + 1 = \rho + 1$$

Luego resultan:

$$\dot{N}(t) = \frac{\rho(1-\beta) - \beta}{1} N(t) + \sum \lambda_i C_i(t) \quad (2)$$

$$\dot{C}_i(t) = -\lambda_i C_i(t) + \frac{\beta i \rho + \beta i}{1} N(t) \quad (3)$$

A las variables $N(t)$, $C_i(t)$ y $\rho(t)$ las descomponemos en sus valores medios (lentamente variables y de valor grande) y sus variaciones y de valor pequeño:

$$N(t) = \bar{N} + M(t); C_i(t) = \bar{C}_i + C_i(t); \rho(t) = \bar{\rho} + \rho(t)$$

Reemplazando en (2) y (3), y teniendo en cuenta que ρ_n es un infinitésimo de orden superior a los restantes términos:

$$\begin{aligned} \dot{\bar{N}} + \dot{n} &= \frac{(\bar{\rho} + \rho)(1 - \beta) - \beta}{1} (\bar{N} + n) + \sum \lambda_i (\bar{C}_i + C_i) = \\ &= \frac{\bar{\rho}(1 - \beta) - \beta}{1} \bar{N} + \sum \lambda_i \bar{C}_i + \frac{\rho(1 - \beta)\bar{N} + \bar{\rho}(1 - \beta)n - \beta n}{1} + \sum \lambda_i C_i \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{\bar{C}}_i + \dot{C}_i &= -\lambda_i (\bar{C}_i + C_i) + \frac{\beta i (\bar{\rho} + \rho) + \beta i}{1} (\bar{N} + n) = \\ &= -\lambda_i \bar{C}_i + \frac{\beta i \bar{\rho} + \beta i}{1} \bar{N} - \lambda_i C_i + \frac{\beta i \bar{\rho} + \beta i}{1} n + \frac{\beta i \bar{N}}{1} \rho \end{aligned}$$

Los términos que contienen exclusivamente valores medios satisfacen a las ecuaciones (2) y (3), por lo cual resulta:

$$\dot{n} = \frac{\rho (1 - \beta) \bar{N} + \bar{\rho} (1 - \beta) n - \beta n}{1} + \sum \lambda_i C_i \quad (4)$$

$$\dot{C}_i = -\lambda_i C_i + \frac{\beta i \bar{\rho} + \beta i}{1} n + \frac{\beta i \bar{N}}{1} \rho \quad (5)$$

Aplicando transformada de Fourier y agrupando términos obtenemos:

$$\left| j\omega + \frac{\beta}{1} - \frac{\bar{\rho} (1 - \beta)}{1} \right| n_{(i\omega)} - \frac{(1 - \beta) \bar{N}}{1} \rho_{(i\omega)} - \sum \lambda_i C_{i(i\omega)} = 0 \quad (6)$$

$$C_{i(i\omega)} = \frac{\beta i \bar{\rho} + \beta i}{1 (\lambda_i + j\omega)} n_{(j\omega)} + \frac{\beta i \bar{N}}{1 (\lambda_i + j\omega)} \rho_{(j\omega)} \quad (7)$$

Reemplazando (7) en (6):

$$\begin{aligned} \left| j\omega + \frac{\beta}{1} - \frac{\bar{\rho}}{1} (1 - \beta + \sum \frac{\lambda_i \beta i}{\lambda_i + j\omega}) \right| n_{(i\omega)} &= \\ &= \frac{\bar{N}}{1} \left| 1 - \beta + \sum \frac{\lambda_i \beta i}{\lambda_i + j\omega} \right| \rho_{(i\omega)} \quad (8) \end{aligned}$$

Teniendo en cuenta que $\beta = \sum \beta i$, resulta:

$$\left| j\omega - \frac{\bar{\rho}}{1} (1 - j\omega \sum \frac{\beta i}{\lambda_i + j\omega}) + \frac{j\omega}{1} \sum \frac{\beta i}{\lambda_i + j\omega} \right| n_{(j\omega)} =$$

$$= \frac{\bar{N}}{1} (1 - j\omega \sum \frac{\beta_i}{\lambda_i + j\omega}) \rho(i\omega) \quad (8)$$

De esta manera podemos obtener la función transferencia (1) en forma explícita:

$$T(i\omega) = \frac{n(i\omega)}{\rho(i\omega)} = \frac{\frac{\bar{N}}{1} (1 - j \sum \frac{\beta_i}{\lambda_i + j\omega})}{- \frac{\bar{\rho}}{1} (1 - j\omega \sum \frac{\beta_i}{\lambda_i + j\omega}) + j\omega (1 + \frac{1}{1} \sum \frac{\beta_i}{\lambda_i + j\omega})} \quad (9)$$

Para este análisis es suficiente considerar dos valores de neutrones retardados, tomando dos promedios de los seis. Dichos valores son:

$$\lambda_i = 0.05 \quad ; \quad \lambda_i = 1.86 \quad (10)$$

Si elegimos un par de frecuencias que denominamos "inferior" ω_i y "superior" ω_s , la relación $R \frac{\omega_i}{\omega_s}$ de la respuesta del reactor para estas dos frecuencias es:

$$R \frac{\omega_i}{\omega_s} = \frac{T(j\omega_i)}{T(j\omega_s)} \quad (11)$$

De acuerdo con los valores (10), la expresión (9), para frecuencias superiores a 5 c/s se puede aproximar con muy poco error a:

$$T(j\omega) = \frac{\frac{\bar{N}}{1} (1 - \beta)}{- \frac{\bar{\rho}}{1} (1 - \beta) + j\omega (1 + \frac{\beta}{i\omega 1})} \quad (12)$$

Como la frecuencia β de neutrones retardados tiene un valor pequeño frente a la unidad, para desarrollar el cálculo podemos suponer $\beta \ll 1$; si además, definimos $K = \bar{\rho}/\beta$ (reactividad en dólares) y $\Lambda = 1/\beta$, la función transferencia resulta, con la reactividad expresada en dólares (para lo cual se divide ρ en el primer miembro por β y se multiplica el segundo miembro por β):

$$T(i\omega) = \frac{N/\Lambda}{\frac{1-k}{\Lambda} + i\omega} \quad (13)$$

En cuyo caso su módulo es:

$$|T(i\omega)| = \frac{N/\Lambda}{\sqrt{\omega^2 + \left(\frac{1-k}{\Lambda}\right)^2}} \quad (14)$$

y la relación R se reduce a:

$$R = \frac{\sqrt{\omega_s^2 + \left(\frac{1-k}{\Lambda}\right)^2}}{\sqrt{\omega_i^2 + \left(\frac{1-k}{\Lambda}\right)^2}} \quad (15)$$

Por lo dicho antes, supongamos que la frecuencia ν_i de excitación del reactor la elegimos $\nu_i = 5$ c/s; nos interesa saber cómo varía la relación R en el entorno del estado crítico, en función de la frecuencia superior ν_s ; para un incremento δk de reactividad tenemos:

$$\delta R = \frac{\partial R}{\partial k} \delta k \quad (16)$$

Para evaluar esta última expresión derivamos la (15):

$$\frac{\partial R}{\partial k} = \frac{(\omega_s^2 - \omega_i^2) \frac{1-k}{\Lambda}}{R \left[\omega_i^2 + \left(\frac{1-k}{\Lambda}\right)^2 \right]}$$

que está representada graficamente en la Figura 1 para distintos valores de k en función de ν_s . Para el estado crítico, $k = 0$, obtenemos, con $\Lambda = 0.01$:

$$\left(\frac{\partial R}{\partial k}\right)_{k=0} = -\frac{10^4 (\omega_s^2 - \omega_i^2)}{R (\omega_i^2 + 10^4)} = -\frac{10^4 (\omega_s^2 - \omega_i^2)}{\sqrt{\frac{\omega_s^2 + 10^4}{\omega_i^2 + 10^4}} (\omega_i^2 + 10^4)} \quad (17)$$

Vemos así que el valor absoluto de δR dado por (16) crece con ν_s ; en consecuencia conviene elegir ν_s grande; pero el valor de esta frecuencia está limitado por razones de sensibilidad en los sistemas de detección. Tal como puede observarse en la (14), para frecuencias grandes el valor de la respuesta en frecuencia es muy chico; a esto se superpone el efecto capacitivo del sistema de detección, además de las dificultades para hacer oscilar el material absorbente de neutrones a frecuencias elevadas. En resumen, por información obtenida en experiencias previas en el reactor RA-2, la factibilidad de este tipo de operaciones comienza a debilitarse a partir de $\nu_s = 30$ c/s; no obstante, el valor que se elija tiene que ser compatible con los requerimientos de la experiencia.

Unos de los requerimientos básicos consiste en que para pequeñas variaciones de reactividad $|\delta R|$ sea detectable, especialmente $k = 0$.

En general una pequeña variación de reactividad significa que el período estable del reactor, para una variación de reactividad positiva y de tipo escalón, de amplitud igual a la que se opera, sea lo suficientemente grande como para poder controlar al reactor. Si suponemos un período de 2 minutos, la reactividad está dada por:

$$k = \frac{1}{T} \left(\Lambda + \sum \frac{a_i}{\frac{1}{T} + \lambda_i} \right) \approx 0.057 \text{ dólar}$$

o sea que, trantándose de reactividades senoidales de frecuencia no inferior a 5 c/s, no hay problemas de seguridad usando amplitudes de reactividad de hasta aproximadamente 0.10 dólar, o aún más, con las debidas precauciones.

Que δR sea detectable significa que R varíe aproximadamente un 5% para la variación de reactividad estimada. Por lo tanto, fijadas las condiciones y teniendo en cuenta la (16) debe cumplirse:

$$\left| \left(\frac{\partial R}{\partial k} \right)_{k=0} \right| \approx 1 \quad (18)$$

Asignando a $\check{v}_i$, el valor de 5 c/s, resolviendo la (17) con la condición (18), resulta:

$$v_s = 23 \text{ c/s} \quad (19)$$

Por todo lo dicho, el par de frecuencia más adecuado compatible con las limitaciones de los sistemas mecánico y electrónico resulta:

$$v_i = 5 \text{ c/s}; \quad v_s = 20 \text{ c/s}$$

En la Figura 2 se muestran curvas que describen la relación R en función de la reactividad k , para varios valores de la frecuencia superior v_s , referidas siempre a $v_i = 5 \text{ c/s}$.

Los trazos llenos corresponden a la expresión (12), mientras los círculos indican los valores experimentales obtenidos con el sistema analógico. Por lo dicho antes, se ha centrado la atención en la curva correspondiente a $\beta_s = 20$ c/s, observándose una buena coincidencia.

Según se desprende en la Figura 2, la variación de R con la reactividad es más sensible cuanto mayor es K, lo cual, cuando K crece por encima del valor $k = 0$ (crítico), constituye un buen auxiliar para el control de seguridad.

En la Figura 3 se muestra un oscilograma con la respuesta del reactor frente a una excitación de reactividad senoidal de amplitud igual a 0.05 dólar, con un valor de $k = 0$, es decir, en estado crítico. Dicha excitación está modulada en frecuencia con onda cuadrada entre las frecuencias inferior y superior. En estas condiciones la relación R de las amplitudes tiene un valor definido que se almacena como dato de comparación con el estado crítico.

Mediante ajuste de filtros la relación R para $k = 0$ se ha hecho aproximadamente igual a uno (puede observarse que la amplitud de 20 c/s es ligeramente menor que la de 5 c/s).

La Figura 4 corresponde a un estado sub-crítico del reactor, con inserción de barra de control hasta $k = -0.05$ dólar; puede apreciarse el cambio del valor de la relación R (la amplitud de 20 c/s es ahora mayor que la de 5 c/s); también se observa que la envolvente define el período para ese valor de reactividad.

Las Figuras 5, 6, 7 y 8 muestran estados subcríticos del reactor, para reactividades negativas de 10, 20, 30 y 40 cts. de dólar respectivamente, notándose que la relación R aumenta a medida que el reactor está más subcrítico.

La Figura 9 corresponde a una reactividad positiva de 10 cts. de dólar. Comparando con la Figura 5, donde la reactividad es de -10 cts., se nota que la relación R es más sensible para el estado hiper-crítico. En la Figura 10 la reactividad es positiva y de valor igual a 5 cts. de dólar.

Vemos así que si un reactor evoluciona lentamente hacia el estado crítico, este método permite medir en cada instante la aproximación crítico, si previamente se calibra el sistema para $k = 0$; asimismo constituye un auxiliar más para el control de estado crítico. Se puede considerar como un inconveniente el hecho de que el sistema sea perturbado

exteriormente, pero la magnitud de tales perturbaciones no alteran el comportamiento normal en forma apreciable.

En la Figura 11 se muestra un diagrama simplificado del equipo de detección y procesamiento de datos, en sus partes constitutivas, como asimismo el reactor y el sistema motor oscilador de barra de control.

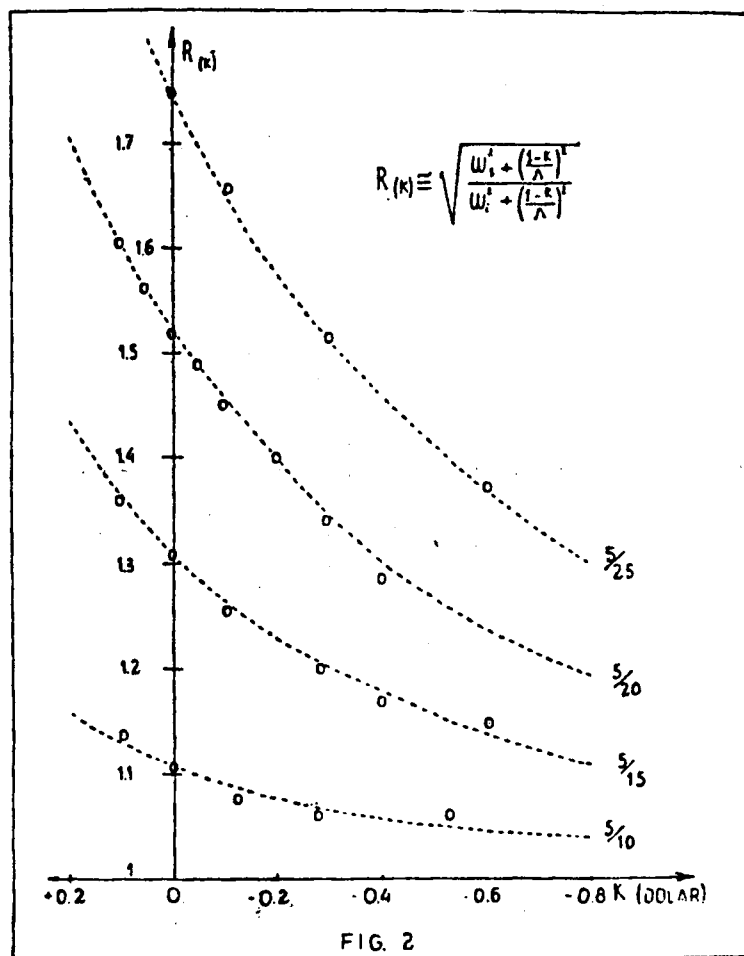
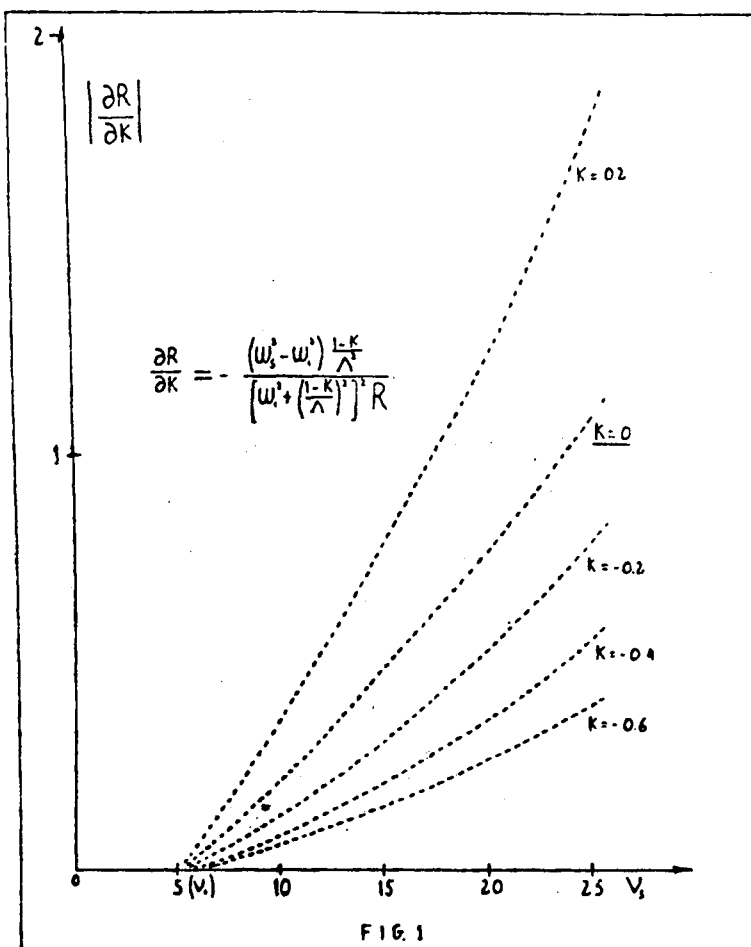
La barra oscilante está acoplada directamente a la bobina móvil de un parlante construido especialmente (ver Figura 12); sobre el eje de acoplamiento está montado el núcleo móvil del transformador diferencial de posición.

De este último sale una señal asociada en cada instante a la posición de la barra oscilante y que va al detector.

con la señal original (senoidal en este caso) que llega al parlante motor a partir del V.C.O., donde la oscilación se modula con el generador de onda cuadrada. De esta manera el motor se ve forzado a seguir la señal original, eliminándose así las distorsiones introducidas por la independencia mecánica del motor, resonancias, etc.

La respuesta del reactor es detectada por la cámara de ionización C.I., cuya señal convenientemente amplificada, es analizado por un sistema elaborado con microcomponentes, el cual da como resultado final el valor de R.

La barra de control consiste en una hoja de cadmio suspendida del núcleo del transformador diferencial mediante un caño delgado de acero inoxidable; el peso de la barra y el del conjunto motor son compensados por un resorte especial, de modo que la acción del parlante se limita sólo a producir las oscilaciones, sin necesidad de una componente continua en la corriente para compensar dicho peso. Una guía de Teflon que actúa sobre el caño de acero impide eventuales desplazamientos horizontales; de este modo tanto el núcleo del L.V.D.T. como la barra oscilan verticalmente sin frotamientos.



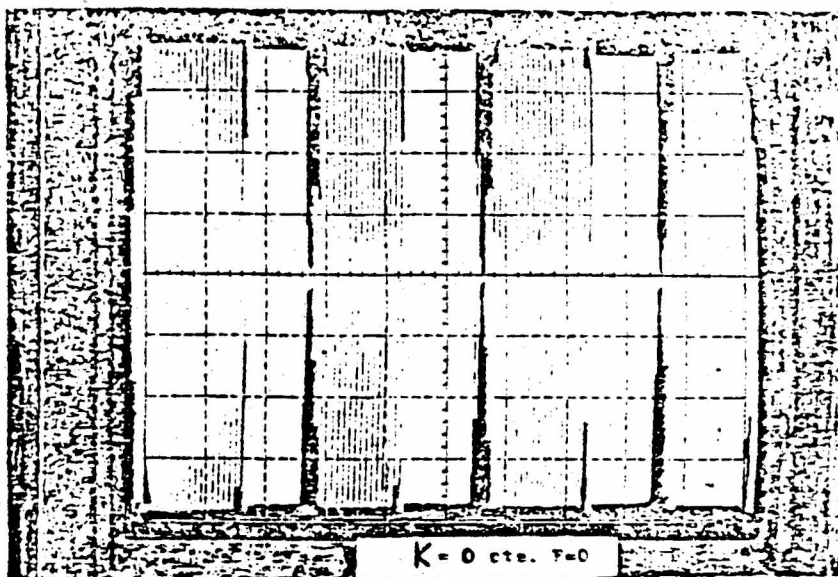


FIG. 3

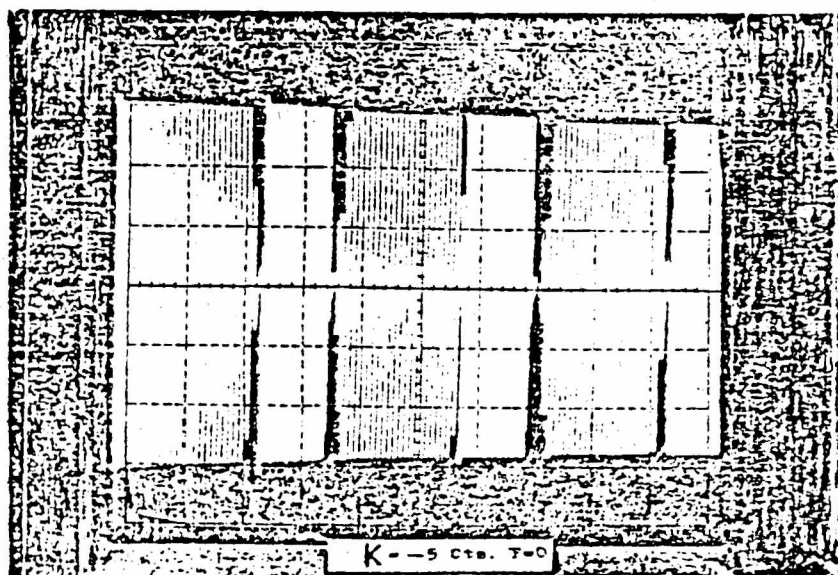


FIG. 4

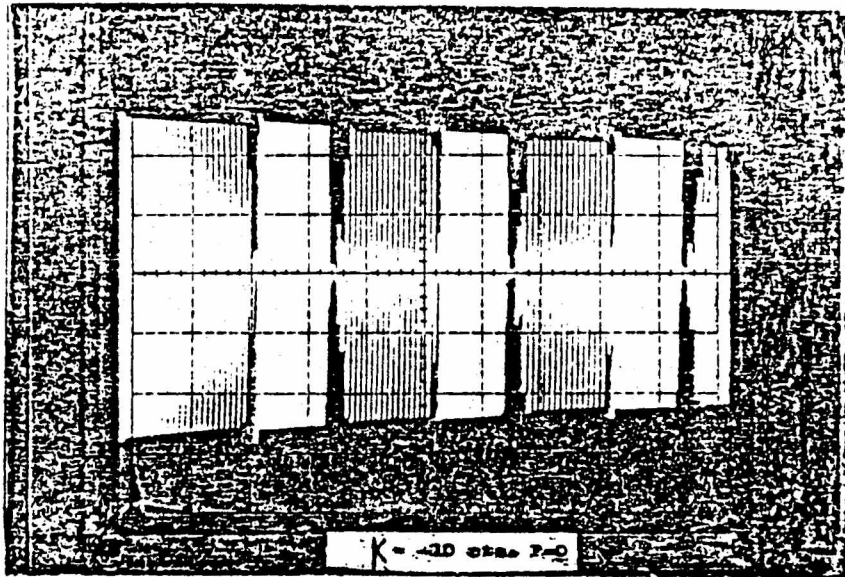


FIG. 5

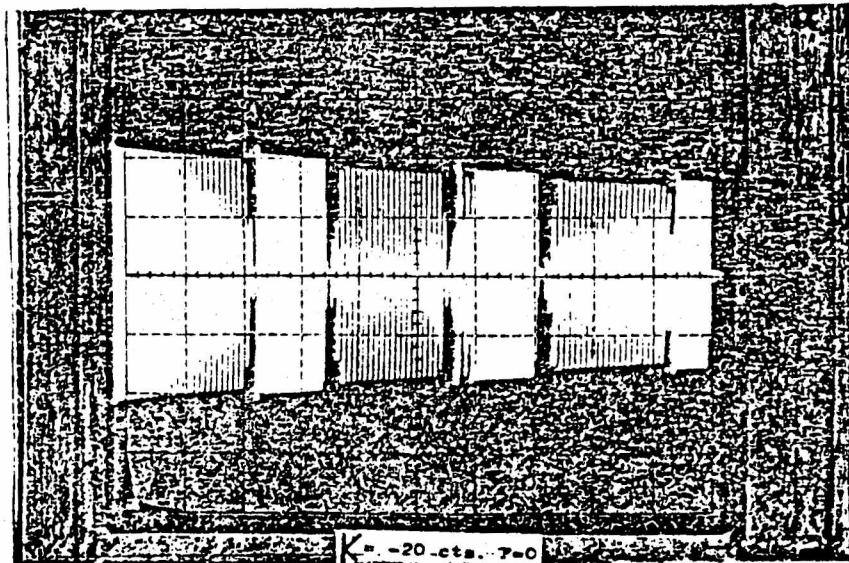


FIG. 6

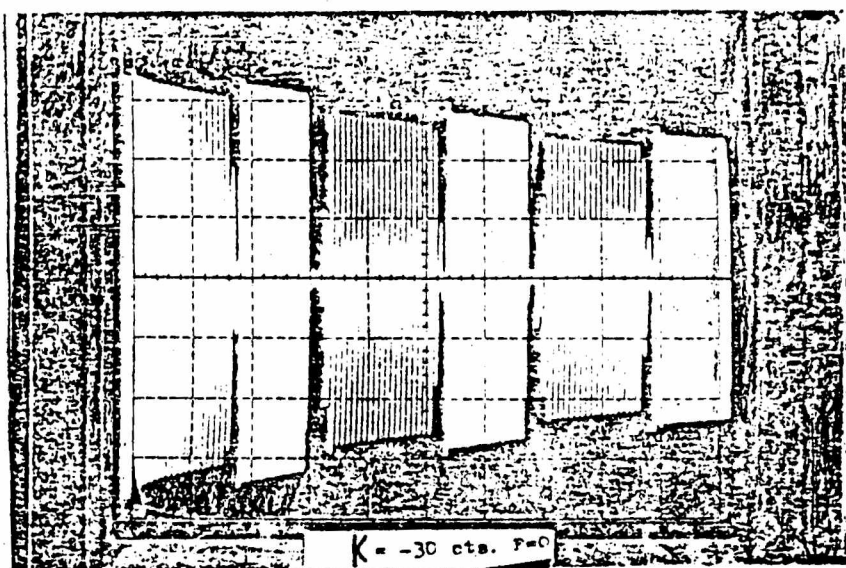


FIG 7

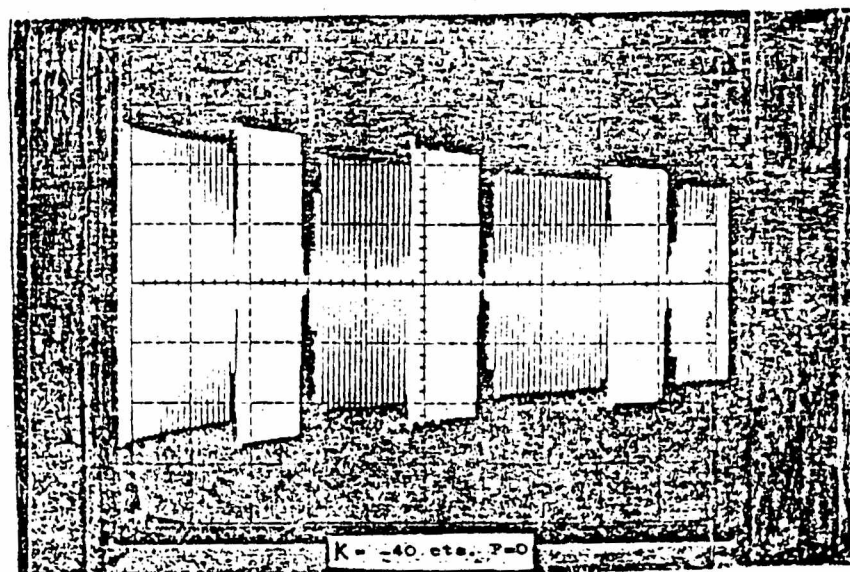


FIG. 8

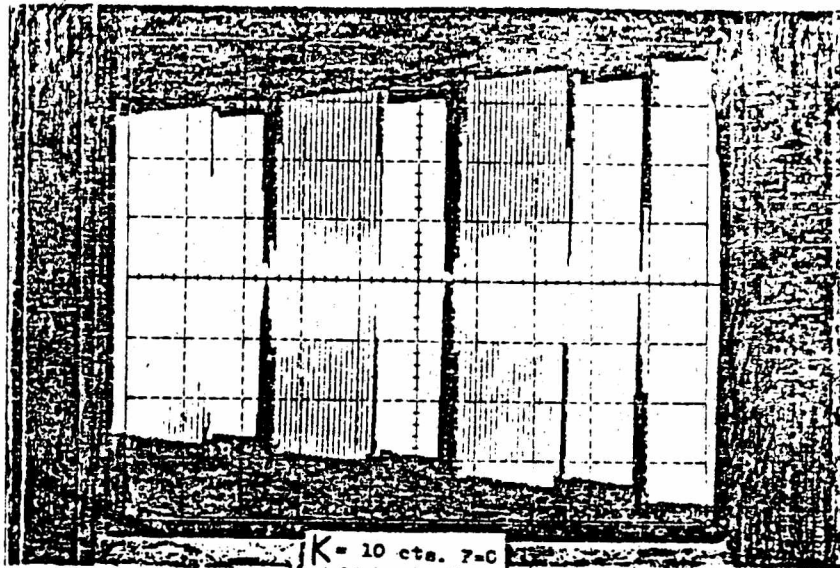


FIG. 9

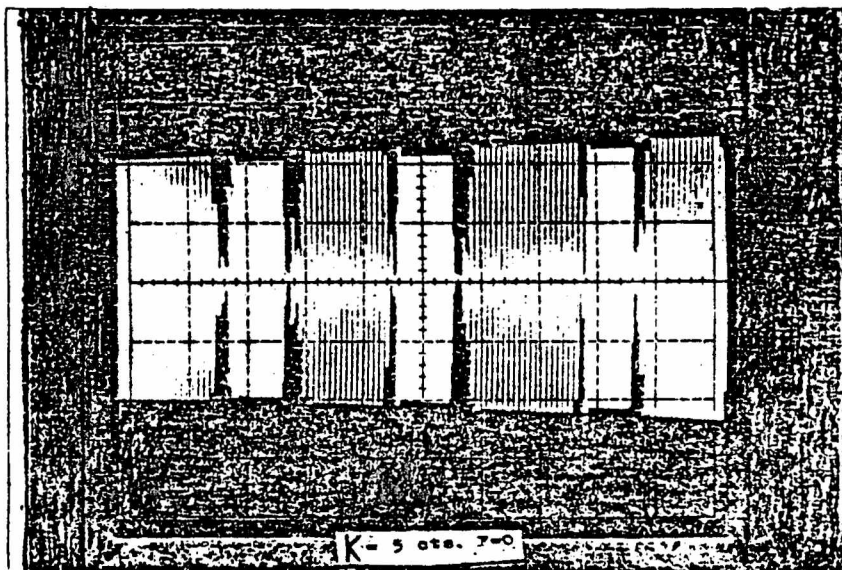


FIG. 10

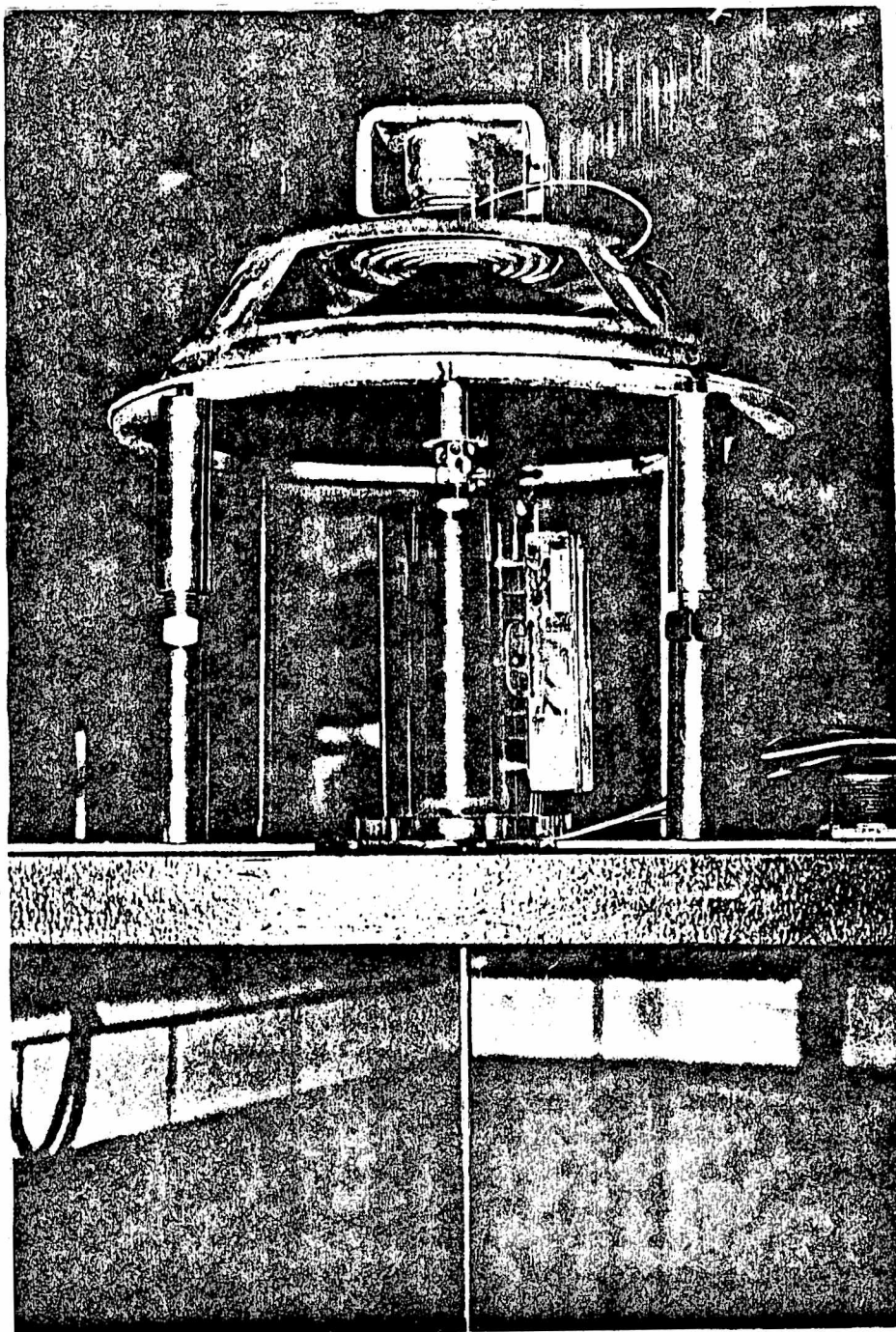


FIG. 12