

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

Facultad de Ingeniería Mecánica

Sección de Post – Grado



**“DESARROLLO DE UN SISTEMA INTEGRAL DE
MEDIOS DE DIAGNOSTICO Y DE METODOS
ESPECIALES PARA EL CONTROL DEL ESTADO
TÉCNICO DE LOS MOTORES DE AVIACIÓN DE LA
F.A.P.”**

TESIS

**PARA OPTAR EL GRADO ACADEMICO DE :
MAESTRO EN INGENIERIA AERONAUTICA**

MENCION: MOTORES DE TURBINA A GAS

RONALD SANDRO NALVARTE SIMONI

PROMOCION 99-II

LIMA – PERÚ

2000

CONTENIDO

| | Pag. |
|---|-------------|
| INTRODUCCIÓN | 6 |
| CAPITULO I | |
| 1. ELECCIÓN DE UN MODELO DE MANTENIMIENTO | |
| 1.1. INTRODUCCIÓN | 10 |
| 1.2. TIPOS DE MANTENIMIENTOS | 12 |
| 1.2.1. El Mantenimiento de Planificación Preventivo (MPP) y Reparación de los motores de aviación. | 12 |
| 1.2.1.1. El Mantenimiento Operativo. | 13 |
| 1.2.1.2. El Mantenimiento Periódico. | 13 |
| 1.2.2. En el Sistema de Mantenimiento y Reparación de los Motores de Aviación por Condición Técnica | 15 |
| 1.2.2.1. Por Condición con Control de Nivel de Confiabilidad | 16 |
| 1.2.2.2. Por Condición con Control y Análisis de los Parámetros. | 16 |
| 1.2.2.3. Por Condición del elemento “Crítico” | 17 |
| 1.3. MODELO DE MANTENIMIENTO IDEAL | 18 |
| CAPITULO II | |
| 2. OBJETIVOS Y METODOS DE CONTROL DEL MOTOR DURANTE SU OPERACIÓN | |
| 2.1. Generalidades | 21 |
| 2.1.1. Capacidad para el control de lo MTG. | 25 |
| 2.1.2. Descripción del Algoritmo. | 28 |
| Algoritmo y Modelo para el Diagnostico de lo MTG según la variación de sus Parámetros Funcionales y características. | |
| 2.2.1. Introducción | 34 |
| 2.2.2. Flujo Informativo Durante el proceso y Control de la Condición Técnica de los MTG. | 38 |

| | | |
|----------|---|----|
| 2.2.3. | Modelos y Algoritmos de los MTG durante el Control y Diagnostico de la condición Técnica. | 39 |
| 2.2.4. | Fundamentos Metodológicos del Diagnostico Parametrico de los MTG | 44 |
| 2.2.4.1. | Elección del Régimen de Trabajo del Motor para objeto de Diagnostico | 45 |
| 2.2.4.2. | Régimen Semejante de Trabajo del Motor. | 47 |
| 2.2.4.3. | Modelos Matemáticos no Evidentes de lo MTG | 55 |
| 2.2.4.4. | Desviación de los Síntomas de Diagnostico. | 62 |
| 2.2.4.5. | El Modelo Matemático Inicial | 71 |
| 2.2.4.6. | Reconocimiento de la Condición del Motor Diferente al Buen Funcionamiento. | 75 |
| 2.2.4.7. | Sistema Complejo Generalizado del Diagnostico de lo MTG. | 84 |

CAPITULO III

3. MÉTODOS Y MEDIOS DE CONTROL NO DESTRUCTIVAS

| | | |
|--------|---|----|
| 3.1. | MÉTODOS Y MEDIOS DE CONTROL NO DESTRUCTIVOS | 87 |
| 3.1.1. | Métodos Visuales y Ópticos | 87 |
| 3.1.2. | Métodos Capilares de Control No Destructivos | 87 |
| 3.1.3. | Métodos por Radiación No Destructivos | 88 |
| 3.1.4. | Métodos Acústicos No Destructivos | 89 |
| 3.1.5. | Métodos Magnéticos de Control No Destructivos | 91 |
| 3.1.6. | Métodos de Inspección por Corriente Circundante | 91 |

CAPITULO IV

4. DIAGNOSTICO DE ACUERDO A LOS PARÁMETROS FUNCIONALES DEL MOTOR

| | | |
|------|--|----|
| 4.1. | GENERALIDADES | 95 |
| 4.2. | SOLUCION DE LAS TAREAS DEL DIAGNOSTICO CON LA AYUDA DE MONOGRAMAS COMPUESTOS | 99 |

CAPITULO V

5. DIAGNOSTICO POR LOS PARAMETROS VIBROACUSTICOS

| | | |
|--------|---|-----|
| 5.1. | GENERALIDADES | 108 |
| 5.2. | PROPIEDADES INFORMATIVAS DE LOS PROCESOS VIBRACIONALES EN LOS MTG | 109 |
| 5.3. | TIPOS DE VIBRACION | 110 |
| 5.3.1. | Vibración del Rotor. | 110 |
| 5.3.2. | Vibración de Origen Aerodinámico | 110 |
| 5.3.3. | Vibración por Procesos de Excitación en el Interior del Motor Canal Aire Gas. | 113 |
| 5.4. | EL ALGORISMO DE DIAGNOSTICOS DEL MTG SEGÚN LOS PARAMETROS VIBRACIONALES SE DIVIDEN EN TRES GRUPOS | 125 |

CAPITULO VI

6. DIAGNOSTICO POR EL CONTENIDO DE PRODUCTOS DEL DESGASTE EN LOS ACEITES Y LUBRICANTES

| | | |
|--------|--|-----|
| 6.1. | GENERALIDADES | 148 |
| 6.1.1. | Tipos de Diagnósticos | 148 |
| 6.2. | PROGRAMA DE ANALISIS ESPECTROMETRICO DE ACEITE Y LUBRICANTES | 152 |
| 6.3. | REQUISITOS PARA EL MUESTREO | 153 |

| | |
|---------------------|------------|
| CONCLUSIONES | 168 |
|---------------------|------------|

| | |
|---------------------|------------|
| BIBLIOGRAFIA | 176 |
|---------------------|------------|

RESUMEN

La Fuerza Aérea del Perú cuenta con una diversidad de motores tanto por su tipo, año de fabricación, país de procedencia y sistema de mantenimiento.

Debido a la exigencia actual de una alta confiabilidad se hace necesario desarrollar nuevos métodos y medio de detección que permitan obtener una información real, amplia y profunda sobre la condición técnica del motor y sus diversos sistemas.

Los MTG de aviación al no tener partes redundantes cualquier defecto crítico produce la inoperatividad del mismo, el aumento del volumen de la información para el diagnóstico, exige no solamente determinar el lugar y las causas del origen de las mismas, sino también pronosticar el posible indicio de alguna falla dentro de un determinado ¿Periodo de Tiempo? de operación, o lo que es lo mismo, determinar el tiempo de operación sin fallas

El mantenimiento con un alto rendimiento económico y disminución del tiempo de inoperatividad, depende en forma directa de la Organización de Mantenimiento técnico y su aplicación.

Se tiene según el año y tecnología de fabricación diferentes tipos de mantenimiento que son principalmente por tiempo fijo, por condición técnica y una combinación ambos llamados el ideal.

El objetivo principal del presente trabajo es interrelacionar los métodos y equipos de tecnología de punta actuales para crear un sistema de mantenimiento que permita responder a la siguiente pregunta ¿ Puede el motor continuar con su operación normal o es necesario retirarlo de la explotación hasta la realización de los procedimientos complementarios de inspección en tierra ?.

Una solución común para esta tarea es el análisis de las desviaciones (Tendencias) de los parámetros medios calculados, para excluir la influencia de las condiciones externas variables en los resultados de los diagnósticos, los parámetros termodinámicos deben llevarse a las condiciones estándar y aplicar las formulas conocidas.

Los métodos y medios de diagnostico debe solucionar las diferentes tareas

- Realizar el diagnóstico y pronóstico de la condición técnica.
- Determinar los síntomas de los defectos o fallas
- Establecer las fallas y las causas de su aparición
- Realizar una evaluación operativa sobre la confiabilidad
- Suministrar la transmisión de la información a un nivel jerárquico superior para el análisis y toma de decisión.

La información obtenida puede ser dividida en dos tipos

- Información de vuelo
- Información complementaria obtenida en tierra

Las informaciones complementarias son :

- Los datos de los controles no destructivos
- Los datos de las inspecciones ópticas y visuales
- Los resultados del análisis espectrométrico del aceite
- Discrepancias encontradas por la tripulación

INTRODUCCION

Las exigencias de una alta confiabilidad, así como de un alto rendimiento económico en la utilización de los motores de aviación a turbina de gas (MTG), origina la continua necesidad de desarrollar nuevos métodos y medios de dirección para el Mantenimiento Técnico y Reparación.

Todas las estrategias existentes y de aquellas en perspectiva sobre el Mantenimiento Técnico de los MTG, proponen en su fundamento disponer de una información real, amplia y profunda sobre la condición técnica del motor, de sus elementos y sistemas.

Sin embargo, es necesario recordar que los MTG para fines del diagnóstico tienen una serie de particularidades específicas siendo las más resaltantes las siguientes:

- ◆ Las cargas térmicas y tensionales que se producen durante el proceso de trabajo en los MTG se encuentran en su límite máximo admisible, un incremento de los mismos ocasionaría la rotura de las partes del motor.
- ◆ Para la prevención de las fallas de los motores en vuelo, es necesario controlar los principales parámetros termo-gasodinámicos con una elevada precisión y en una escala real de tiempo.
- ◆ Los MTG de aviación no tienen partes y elementos redundantes, por eso la rotura de cualquier elemento principal (álabes, discos, cámaras de combustión y otros) produce la inoperatividad de los motores, lo que exige la utilización de métodos para el pronóstico de la condición técnica de los motores, a fin de determinar el máximo tiempo posible de una operación segura y pronosticar las posibles fallas y discrepancias antes de que estas se produzcan. Sin embargo, todo ello dificulta significativamente los métodos del diagnóstico, exigiendo una mayor preparación de los ingenieros y especialistas para el mantenimiento técnico de aquellos MTG que si llevan elementos o sistemas redundantes.

- ◆ Es característico en los MTG la interacción entre los procesos físicos que se producen en el, esto exige el diseño de modelos sumamente complicados, que describan los indicios de la aparición y desarrollo de las fallas y de ser necesario la obtención de una amplia información sobre los parámetros físicos de los procesos de distinta naturaleza.

De lo expuesto, se puede observar que durante el diagnóstico técnico de los MTG, debe realizarse un procesamiento y análisis integral de la información diagnosticada utilizando modelos matemáticos en estrecha relación con los diferentes procesos físicos, considerando las condiciones y los distintos factores que influyen en origen y el desarrollo de los defectos y fallas.

Estos medios se dividen en:

- ◆ De a bordo, que sirve para evaluar en forma operativa la condición del motor durante el vuelo y además, para el registro de los parámetros principales del motor; sus análisis posterior.
- ◆ Terrestres, suministran el procesamiento y análisis de la información de vuelo, asimismo por métodos de control no destructivos de los elementos más importantes y mas críticos.

Sin embargo, en condiciones de una constante modernización y complejidad de los MTG, el aumento del volumen de la información para el diagnóstico, exige no solamente determinar el lugar y las causas del origen de las fallas en el motor, sino también pronosticar el posible indicio de alguna falla dentro de un determinado ¿Período Tiempo? de operación, o lo que es lo mismo, determinar el tiempo de operación sin fallas.

De esta forma han sido expuestas las condiciones y exigencias para la elaboración en base a la informática de efectivos Sistemas Automatizados de Control (SAC) para la condición técnica de los MTG.

En función del tipo y la forma de ingreso de la información para el diagnóstico del motor o de la aeronave, y del modo del procesamiento y presentación de los resultados finales, los sistemas de los MTG en forma condicional se divide en:

- ◆ Terrestre
- ◆ De a bordo
- ◆ Combinado

En la actualidad nivel mundial se utilizan en función del tipo y aplicación de la aeronave los tres SAC indicados.

CAPITULO N° 1

ELECCION DE UN MODELO DE

MANTENIMIENTO

1.- ELECCION DE UN MODELO DE MANTENIMIENTO

1.1.- INTRODUCCION

El mantenimiento de la seguridad y regularidad de los vuelos con un alto rendimiento económico depende en forma muy significativa de la organización del Mantenimiento Técnico y Reparación de los MTG cada vez más modernos y complejos.

La organización de los trabajos para el Mantenimiento de los motores y el orden de su realización se efectúa en correspondencia a determinadas normas y disposiciones y relacionadas entre sí. El carácter específico de las normas y disposiciones indicadas determinan el tipo de sistema ó estrategia para el Mantenimiento y Reparación de los motores aeronáuticos.

Se entiende por Mantenimiento Técnico a un conjunto de trabajos dirigidos a mantener la operatividad y de conservar la capacidad de trabajo de los motores durante la preparación y realización de los vuelos y durante la conservación y transporte de los mismos.

Se entiende por Reparación a un conjunto de trabajos dirigidos al restablecimiento ó recuperación del buen estado y de la capacidad de trabajo de los motores de aviación.

El Mantenimiento y Reparación de los motores de aviación incluyen trabajos profilácticos planificados dirigidos a prevenir las fallas y el mal estado del motor, así como, los trabajos de pronóstico para la detección y eliminación de las fallas antes de que estas se produzcan.

Dependiendo del tipo de trabajo que predominan en una u otra sistema (estrategia) para el mantenimiento y reparación, se distinguen los siguientes sistemas:

1. El sistema de Planificación - Preventivo de mantenimiento y reparación de los motores (por tiempo de servicio, por tiempo de operación sin fallas y otros).

2. El sistema de Mantenimiento y Reparación por condición técnica; el cual a su vez se divide en:
 - ◆ Por condición con control de nivel de confiabilidad.
 - ◆ Por condición con control y análisis de los parámetros
 - ◆ Por condición limite:
 - Explotación continua hasta que se produzca la falla de algún elemento del motor;
 - Por el vencimiento del numero de ciclos o termociclos limites del elemento; conjunto o subconjunto del motor.
 - Por el vencimiento de su tiempo de servicio del elemento “Crítico” conjunto o subconjunto del motor.

Sin embargo, es necesario considerar la generación a la que pertenece cada motor, para la cual ha sido diseñada y desarrollada su correspondiente estrategia del Mantenimiento y Reparación.

En la actualidad todos los motores de aviación que se diseñaron y fabricaron hace 25 y 30 años, necesariamente tendrán un sistema combinado de Mantenimiento y Reparación prevaleciente el sistema de planificación-preventiva.

Las ultimas generaciones de motores aeronáuticos por sus características de diseño y explotación fueron orientados al sistema de Mantenimiento y Reparación por “CONDICION TECNICA”.

1.2.- TIPOS DE MANTENIMIENTO

1.2.1. EL MANTENIMIENTO DE PLANIFICACION-PREVENTIVO (MPP) Y REPARACION DE LOS MOTORES DE AVIACION

(SEGÚN TIEMPO DE VIDA FIJO)

El sistema de Planificación - Preventivo de Mantenimiento y Reparación reglamenta rígidamente el volumen de los trabajos profilácticos y la periodicidad de su realización,. Después de que el motor alcanza un determinado tiempo de operación sin fallas es remitido para su reparación. Los criterios y el orden para el mantenimiento se determinan por los documentos técnicos - normativos, que dependen de las propiedades de explotación del motor y se proveen con una organización estructural de servicios de ingeniería aeronáutica y de equipamiento técnico.

El principal documento, que determina el volumen y la periodicidad de la realización de los trabajos durante el proceso de operación es el Reglamento de Mantenimiento Técnico (RMT), este se elabora durante el proceso del diseño y fabricación de los motores, el mismo que es corregido en forma continua a medida que se va acumulando experiencias en la explotación, en base al procesamiento de datos estadísticos sobre el mal estado y las fallas de algunos elementos y sistemas del motor, por el análisis cualitativo del mal estado y las fallas de los elementos del motor , también por la apreciación de la confiabilidad de los principales accesorios y elementos de las fallas más peligrosas.

Durante el proceso de elaboración y corrección del reglamento se tiene en cuenta que el volumen y la periodicidad de los trabajos profilácticos en el mantenimiento del buen estado y la operatividad del motor, de sus accesorios y sistemas funcionales en buen grado.

Depende de una serie de indicadores importantes, tales como: la confiabilidad, la efectividad, así como de la magnitud de los costos de operación.

En un sistema de Planificación - Preventivo, los reglamentos toman en cuenta el cumplimiento de dos tipos de mantenimiento técnico: el mantenimiento periódico (MP) y el mantenimiento operativo (MO).

1.2.1.1. El Mantenimiento Operativo se realiza antes y después del vuelo de la aeronave con el objeto de eliminar el mal estado y las posibles fallas, así como también la preparación de la aeronave para el siguiente vuelo.

1.2.1.2. El Mantenimiento Periódico se realiza con determinada periodicidad de acuerdo a los tiempos de operación o al número de arranques. Este tipo de mantenimiento se realiza en los aeropuertos bases para poner en evidencia el mal estado o las fallas de la aeronave o de los motores de sus distintos sistemas, accesorios y elementos, así como la realización de diferentes trabajos profilácticos para prevenir el origen de los mismos. Durante el mantenimiento periódico, se realiza el cambio de accesorios que han cumplido su tiempo de operación.

Los trabajos de mantenimiento de los motores establecidos en los reglamentos, se realizan de acuerdo a las indicaciones tecnológicas de mantenimiento técnico. En este documento están vertidas las indicaciones sobre el orden, sucesión, métodos y condiciones técnicas durante el cumplimiento de los trabajos, sobre las herramientas necesarias, equipamiento y materiales de consumo, así como del orden de control de los mismos.

La explotación de la técnica aeronáutica origina los procesos físicos recíprocamente contrarios. Un proceso sería el agravamiento de la condición técnica del motor durante su funcionamiento y conservación. El segundo proceso representa el restablecimiento del mismo durante el Mantenimiento por medio del intercambio de los elementos que han fallado, las reparaciones, regulaciones y las actividades profilácticas.

La variable de la condición técnica durante la explotación depende en gran parte a una serie de factores aleatorios por lo cual lleva **un carácter indeterminado**. Por otro lado, el Sistema de Mantenimiento de Planificación - Preventivo, está basado en un **enfoque predefinido**, que establece el cumplimiento de trabajos reglamentarios con una determinada periodicidad. De esta forma, se observa que no existe una reciprocidad entre el carácter indeterminado del agravamiento de la condición técnica de los motores durante el proceso de explotación y la organización predefinida de los trabajos para su restablecimiento.

Gran parte de los trabajos realizados durante el Mantenimiento de acuerdo al Sistema de Planificación - Preventivo no determina la real condición de los motores, por esta razón en una serie de casos se hacen innecesarios, lo que disminuye la efectividad del Mantenimiento, si bien es cierto que, es un método confiable y seguro ocasiona que los costos del mantenimiento sean muy elevados.

Las desventajas del Sistema de Planificación - Preventivo son conocidas, por las cuales las empresas de explotación constantemente buscan el camino de modernizar el Sistema de Mantenimiento Técnico (SMT) en los últimos años se realiza en base al aumento de la periodicidad y reducción del volumen de los trabajos reglamentarios.

La utilización de la estrategia de mantenimiento por condición técnica permite eliminar la falta de correspondencia del carácter indeterminado de agravamiento de la condición técnica de los motores durante el proceso de explotación con respecto a la determinación del volumen y organización de los trabajos para su restablecimiento; ya que el volumen y contenido de los trabajos por este método determina la condición técnica de los motores de aviación.

1.2.2. EN EL SISTEMA DE MANTENIMIENTO Y REPARACION DE LOS MOTORES AVIACION POR CONDICION TECNICA

(ENGINE CONDITION MONITORING)

El sistema (Estrategia) de Mantenimiento y Reparación por condición, considera la variación real de la condición técnica durante el proceso de explotación del motor y utiliza distintos métodos de Mantenimiento y Reparación en tiempos flexibles para la realización de los trabajos en relación a la condición real de los elementos, grupos y sistemas del motor.

Se distinguen los siguientes métodos de mantenimiento y reparación de los motores de aviación por condición técnica:

1.2.2.1. Por condición con control de nivel de confiabilidad.-

Provee la designación y realización de las acciones profilácticas y de reparación de toda la flota de motores cuando alcanza un determinado nivel estadístico sobre el límite de confiabilidad.

El Método de Mantenimiento y reparación con control del nivel de confiabilidad se utiliza cuando se tiene un efectivo sistema de recolección, procesamiento y análisis de la información sobre la confiabilidad de los motores y de sus partes, este permite evaluar en forma operativa los indicadores cualitativos de la confiabilidad y la tendencia de sus variaciones.

Las fuentes principales de información son:

- ◆ Las observaciones anotadas por la Tripulación; el resultado de las inspecciones de los motores por especialistas de distintos niveles; características de la explotación de los conjuntos, subconjuntos, y elementos combinados y aquellos que fallaron; la estadísticas de los trabajos realizados y de los vuelos retrasados y otros.
- ◆ Este método puede utilizarse en base al análisis del nivel de confiabilidad de toda la flota de los motores de un determinado tipo.

1.2.2.2. Por condición con control y análisis de los parámetros .-

Caracteriza la condición técnica del motor, este método se utiliza durante la designación y realización de los trabajos profilácticos y de reparación, en base a los resultados de análisis de la variación de los parámetros que caracterizan la condición real de los motores, permitiendo pronosticar la tendencia de la variación del estado técnico en el tiempo.

El método de Mantenimiento y reparación por condición con control y análisis de los parámetros se utiliza cuando el volumen de la información paramétrica, los medios y métodos de control de la condición de los motores permiten la variación de la condición en el tiempo con mucha certeza garantizando el nivel determinado de seguridad de los vuelos. Esto se puede lograr debido a los siguientes factores:

- ◆ Alta capacidad de control del motor;
- ◆ Existencia de sistemas de autocontrol de abordaje;
- ◆ Servicios de diagnósticos y pronósticos de la condición del motor, abastecidos de los medios necesarios de recolección, procesamiento de la información obtenida (En vuelo, como resultado de las inspecciones, comprobaciones, arranques de control y comprobación del motor y otros);
- ◆ Medios de control no destructivos (PND) e instrumentales;
- ◆ Existencia de las documentaciones técnico - normativas estableciendo los valores límites admisibles y tolerancias de los parámetros; reglamentarios y algorítmicos de control de la condición técnica., el orden en la toma de decisión sobre la explotación de los motores por los resultados del control y otros.

1.2.2.3. Por condición del elemento “crítico”.-

Se entiende por aquella explotación hasta que se produzca la falla, por el vencimiento de la cantidad de ciclos (termociclos) de los elementos, conjunto o subconjuntos del motor, ó por el vencimiento del recurso horario del elemento “crítico” del motor.

El método de mantenimiento y reparación con intercambios de sus elementos, accesorios después de producida la falla se utiliza en los casos cuando la falla presentada no influye sobre la seguridad y regularidad de los vuelos, y su alta susceptibilidad a ser controlado brinda la información sobre las fallas ocurridas en la cabina de tripulación o al personal de servicio.

Este método también incluye la explotación del motor con intercambio de elementos, de conjuntos y subconjuntos por vencimiento la cantidad de ciclos (Termociclos) determinados por el fabricante, así como también el vencimiento del recurso horario de los elementos “Críticos” del motor.

1.3.- MODELO DE MANTENIMIENTO IDEAL

Para un complicado sistema funcional como son los motores aeronáuticos una estrategia real de Mantenimiento Técnico y Reparación debe ser un sistema combinado basado en tres métodos:

Por tiempos de servicio establecidos rígidamente.

Por condición con control y análisis de parámetros

Por condición con el control del nivel de confiabilidad, que incluye el método de operación hasta que se produzca la falla.

Los Primeros dos métodos se utilizan como los principales para el Mantenimiento y reparación de los motores, el tercero puede emplearse para el control de la correcta ejecución de los dos primeros, si es que en las empresas de explotación se dispone de un sistema de evaluación operativa de la confiabilidad. Esto permite realizar un seguimiento de la variación de los parámetros de confiabilidad y variar flexiblemente los intervalos de tiempo

Sin embargo, tal como demuestra la experiencia de explotación, junto a la elaboración de los criterios de diagnóstico de la condición del motor, deben tomarse en cuenta aquellos, que caracterizan el vencimiento del recurso horario (tiempo de vida útil) desde el punto de vista del decremento de resistencia de los elementos “Críticos”.

De esta forma, los métodos del Mantenimiento de los MTG por tiempos rígidos y por condición con el control de parámetros están interrelacionados y un efecto positivo puede ser alcanzado por medio de una utilización conjunta; sin embargo, la utilización de los métodos del mantenimiento técnico están determinados por:

La capacidad para el control de parámetros de MTG.

Los métodos y medios de control de diagnóstico.

CAPITULO N° 2

OBJETIVOS Y METODOS DE CONTROL

DEL MOTOR DURANTE SU OPERACIÓN

2.- OBJETIVOS Y METODOS DE CONTROL DEL ESTADO DEL MOTOR DURANTE SU OPERACIÓN

2.1.- GENERALIDADES

Evaluando el área que abarca el diagnóstico técnico, podemos examinar tres métodos para determinar la condición técnica de los motores.

El primer método determina la condición del motor en el tiempo actual, el cual se denomina Método de diagnóstico. El segundo método pronostica la condición del motor que tendrá en el tiempo, el cual se denomina Método Predictivo. El tercer Método determina la condición en la cual se encontraba el motor que este es el Método de registro Histórico.

El método del registro histórico permite investigar las causas de las averías, catástrofes etc. comparar la condición técnica, los parámetros, las características que tuvo el motor con respecto al tiempo actual, etc. Esto se hace posible por medio de historiales, registros etc. del motor.

El método predictivo permite el recurso horario del motor o la asignación de la periodicidad de los controles profilácticos y reparaciones; así como determinar la posible o probable evolución y tendencia de la condición técnica del motor en el tiempo, siendo de suma importancia del Mantenimiento por condición (en lugar del método de mantenimiento por tiempos rígidos).

Una contraposición directa entre el método de diagnóstico y el método predictivo no es posible debido a la diferencia de modelos con los que debe trabajar; para el método de diagnóstico, el modelo es generalmente la descripción de los parámetros y características del motor del momento, mientras que para el método predictivo es el proceso de la evolución de las características técnicas del motor en el tiempo.

Como resultado del diagnóstico se determina cada vez no más de un “punto” del indicado proceso de evolución en un intervalo de tiempo determinado; sin embargo, con una buena organización para el mantenimiento del diagnóstico del motor, y la conservación de todos los resultados anteriores se puede dar una información útil y objetiva, la misma que, a su vez representa la dinámica del proceso de variación de sus características, los cuales pueden ser utilizados para una corrección sistemática del pronóstico e incrementar su veracidad.

El alto costo del motor exige el suministro de grandes recursos, lo que se alcanza con la introducción una estrategia óptima de explotación hasta antes que se produzca la falla de sus elementos y partes.

La toma de la decisión sobre el cese de la operación de un determinado tipo de motor se realiza con la utilización de todo el arsenal de medios de diagnóstico técnico.

Otro riesgo diferente muy importante de un moderno motor de aviación, que determina la concepción del diagnóstico técnico, es el elevado valor de los esfuerzos tensionales y térmicos de los elementos de constructivos del motor.

Los esfuerzos técnicos y tensionales se encuentran en el límite superior admisible por resistencia. Un incremento de los esfuerzos mayores a los permisibles llevaría a la destrucción de las piezas y por consecuencia la falla del motor. Para la prevención de fallas peligrosas es necesario el control de los principales parámetros termo-gasodinámicos del motor con una alta exactitud y confiabilidad.

Es muy frecuente que el procesamiento de la información de los parámetros controlados y la toma de decisiones de diagnóstico deban realizarse en una escala real de tiempo, es decir en pequeños intervalos, en los cuales no sucede significativas variaciones en los parámetros del motor.

Los motores no tienen sistemas o elementos redundantes.

La destrucción de cualquier elemento principal del motor (Alabes, Disco, Cámara de Combustión y otros) conlleva como regla general a la pérdida de su capacidad de trabajo. Esta particularidad exige la utilización de métodos predictivos para determinar la condición técnica de los elementos, conjuntos y subconjuntos del motor, a fin de evaluar el tiempo posible de una operación segura con fallas o cierto mal estado, aquellas que surgen a comienzos de su desarrollo.

Por ejemplo: durante la detección de microfisuras en el disco del compresor o de turbina, es importante determinar el tiempo en el cual el agrietamiento llegará a alcanzar una dimensión crítica, y a su tiempo realizar el cambio del disco defectuoso antes de su destrucción. La concepción de operar hasta antes que se produzca la falla establece una amplia introducción de métodos y medios, que permitan pronosticar la condición técnica del motor.

Esta diferencia complica significativamente los métodos de diagnóstico de los motores con los de otros sistemas técnicos, que tienen elementos o sistemas redundantes, la operación de los cuales se realiza hasta que se produzca la falla de estos elementos.

La particularidad de los motores de aviación a Turbina de gas es la presencia de una estrecha interrelación entre los diferentes procesos físicos, que se producen en ellos.

Esta interrelación conduce hacia modelos muy complejos, que describen los síntomas del diagnóstico, asimismo, los procesos del origen y desarrollo de las fallas. Por ejemplo, las pulsaciones de presión en la cámara de combustión del motor puede producir oscilaciones resonantes en las etapas del rotor del compresor, lo que produce a su vez daños por fatiga del material del disco y su destrucción.

Para un diagnóstico cualitativo de la condición técnica del motor es necesario obtener una amplia información sobre los parámetros físicos de proceso de distinta naturaleza. Además, debe realizarse un procesamiento y análisis complejo de la información controlada, y la utilización de modelos matemáticos interrelacionados con los diferentes procesos físicos, considerando los factores que incluyen y que además condicionan directamente el desarrollo de las fallas y el mal estado.

Los modelos de diagnóstico se utilizan para la información de datos (síntomas) informativos de diagnóstico, asimismo, para la simulación numérica de los procesos funcionales de un motor operativo con el objeto de comparar los parámetros característicos calculados con los valores reales obtenidos mediante la medición y posteriormente tomar la decisión sobre la condición técnica del motor.

Los medios técnicos para el diagnóstico del motor se dividen: de abordó, que sirven para que la tripulación tenga una apreciación operativa sobre la condición técnica del motor en vuelo y para el registro de los principales parámetros del motor en el registrador magnético, asimismo, la tierra, que suministra el tratamiento y análisis de la información de vuelo y el control periódico de los elementos más importantes con la ayuda de los equipos de control no destructivos.

Ante una gran variedad de medios técnicos para el diagnóstico, se logra un máximo efecto la utilización en forma conjunta de varios de ellos, sobre todo si la decisión se toma en base a los diferentes métodos y considerando la información de los distintos medios de control.

2.1.1. CAPACIDAD PARA EL CONTROL DE LOS MTG

El motor de aviación como objeto de diagnóstico debe satisfacer ciertas exigencias tales como la capacidad de control, es decir, la capacidad de adaptación de su construcción para la utilización de diversos métodos modernos y diferentes medios de diagnóstico y pruebas no destructivas.

La capacidad de control es una propiedad del motor que se considera en la etapa de diseño en conformidad a los documentos normativos actuantes. El nivel de la capacidad de control se establece partiendo de las particularidades de la explotación de la aeronave o del motor, así como también, de la efectividad de los medios de diagnóstico planificados para su utilización.

Las principales características del motor, que determinan el nivel de la capacidad de control son:

- ◆ La cantidad de parámetros a controlarse
- ◆ La sensibilidad de estos parámetros en relación al mal estado y fallas que producen
- ◆ La estabilidad de las magnitudes físicas obtenidas por medición durante el control de motores operativos y en buen estado
- ◆ La accesibilidad de su construcción para la utilización de los medios de control no destructivos sin necesidad del desarmado (el número de ventanillas o de orificios de acceso, ausencia de las cavidades cerradas y otros).

Los parámetros que se controlan en los motores aeronáuticos a turbina de gases, se dividen en cuatro grupos.

Al primer grupo se relacionan los parámetros funcionales, que caracterizan los principales procesos termo-gasodinámicos del motor y las condiciones externas de su trabajo tales como: la presión y temperatura del aire y gas en la entrada y salida del compresor, cámara de combustión, turbina; la frecuencia rotacional de los rotores de baja y alta presión; a la salida de la Cámara de Combustión y la presión total en la entrada del motor, las características termo-gasodinámicas reales de la atmósfera a distintas alturas de vuelo.

Al segundo grupo pertenecen los parámetros de aceite y combustible tales como: la presión y temperatura de aceite y combustible en diferentes puntos; el consumo volumétrico o masico de combustible a través de la cámara de combustión, la concentración de partículas metálicas en el aceite como consecuencia del desgaste de las piezas por fricción.

Al tercer grupo pertenecen aquellos parámetros, que permiten realizar el diagnóstico del motor, los mismos que caracterizan la condición técnica de algunos elementos, conjuntos o subconjuntos. Uno de estos parámetros es la vibración del motor, que permite apreciar la condición de los conjuntos rotativos. A este grupo también se pueden relacionar las pulsaciones del flujo o de presión en la cámara de combustión.

El cuarto grupo lo conforman aquellos parámetros que caracterizan el régimen de trabajo del motor tales como: la posición de la palanca de mando del motor, también los comandos del sistema de mando automático del motor, que establecen un determinado régimen de su trabajo.

La elección de la nomenclatura de parámetros que se controlan para un tipo concreto de motor se realiza en base al análisis de confiabilidad y a la experiencia en la explotación de motores prototipos considerando las exigencias de control de los parámetros más informativos, por ejemplo la temperatura del gas detrás de la turbina, la frecuencia de rotación de los rotores, la vibración del motor y otros.

La sensibilidad del parámetro a controlarse con respecto a las fallas y al mal estado, que surgen en el motor, depende del lugar, en el cual se realiza la medición, también de la correcta elección de la magnitud física o un conjunto de magnitudes físicas, que determinan este parámetro. Por ejemplo la vibración puede caracterizarse por el desplazamiento, velocidad o aceleración de un punto, en el cual se realiza la medición. Al diagnosticar los defectos, condicionados por la oscilación a bajas frecuencias de los elementos, es recomendable medir la vibración por desplazamiento o por velocidad. Durante las oscilaciones a alta frecuencia a lo más cómodo es la medición por aceleración.

La estabilidad de los parámetros que se controlan se caracteriza por la veracidad de la información obtenida. Se distinguen la estabilidad temporal, es decir la conservación de la magnitud del parámetro en un régimen determinado y en condiciones externas constantes del trabajo del motor durante su tiempo de servicio, asimismo, la estabilidad del parámetro durante las mediciones de varios motores de un mismo tipo en mismos regímenes y condiciones de explotación.

El criterio que caracteriza la estabilidad del parámetro a medirse, es el valor de su dispersión, calculada por los diferentes tiempos de realización o por la elección de varios motores de un mismo tipo.

La accesibilidad del motor para la aplicación de inspecciones por medio visuales y ópticas de control u la capacidad de control para la aplicación de equipos universales y especializados de control no destructivos son propiedades muy importantes, que proporcionan la eficiencia en la explotación del motor los cuales permiten realizar un control cualitativo del estado de sus partes durante el mantenimiento sin desmontar el motor del ala.

2.1.2. DESCRIPCION DEL ALGORITMO

1.- Para la sucesión temporal de los síntomas de diagnóstico F_t , teniendo en cuenta las recomendaciones arriba indicadas, se establece el tramo de realización N , para el cual se evalúa el valor promedio, la dispersión y el coeficiente de autorregresión.

2.- Se realiza la valoración de los parámetros por las formulas:

$$F = \frac{1}{N} \sum_{I=1}^N F_{t=i}$$

$$\sigma^2_F = \frac{1}{N-1} \sum_{I=1}^N (F_{t=i} - F)^2;$$

$$F^*_{t=i} = \frac{F_{t=i} - F}{\sigma_F}$$

$$P = \frac{1}{N-1} \sum_{I=1}^N F^*_{t=i} F^*_{t=i-1}$$

3.- Se realiza las transformaciones logarítmicas del coeficiente de autorregresión (Transformación de Fisher) por la formula:

$$\Phi = \frac{1}{2} \ln \frac{1+p}{1-p}$$

- 4.- Se determina el valor máximo para la transformación logarítmica del coeficiente de autorregresión, partiendo de la minimización de pérdidas, condicionados por los errores relacionados con las falsas revelaciones.

$$\Phi_{\max} = \frac{\bar{\Phi}_{1rp} + \bar{\Phi}_{2rp}}{2} - \frac{1}{(N-3)(\Phi_{\max} \vee \Phi_{1\max})} \ln K,$$

$$K = \frac{PC_1}{(1-P)C_2}$$

(P – posibilidad que precede la aparición de fallas en el motor que se controla; C₁ – costos de las pérdidas, ocasionados producto de la desviación; C₂ – costos de las pérdidas, ocasionados por las falsas revelaciones (desviaciones);

$$\Phi_{1\max} = \frac{1}{2} \ln \left[\frac{\left(\frac{\operatorname{tg} 0.95 \pi}{2} \right)}{\operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{N} \right)} \right]$$

- 5.- Se evalúa la estabilidad de las series de síntomas para el diagnóstico utilizando la siguiente regla:

$$\Phi_{2\max} = \frac{1}{2} \ln \left[\frac{\left(\frac{\operatorname{tg} (0.05 \pi)}{2} \right)}{\left(\frac{\operatorname{tg} \frac{\pi}{N}}{N} \right)} \right]$$

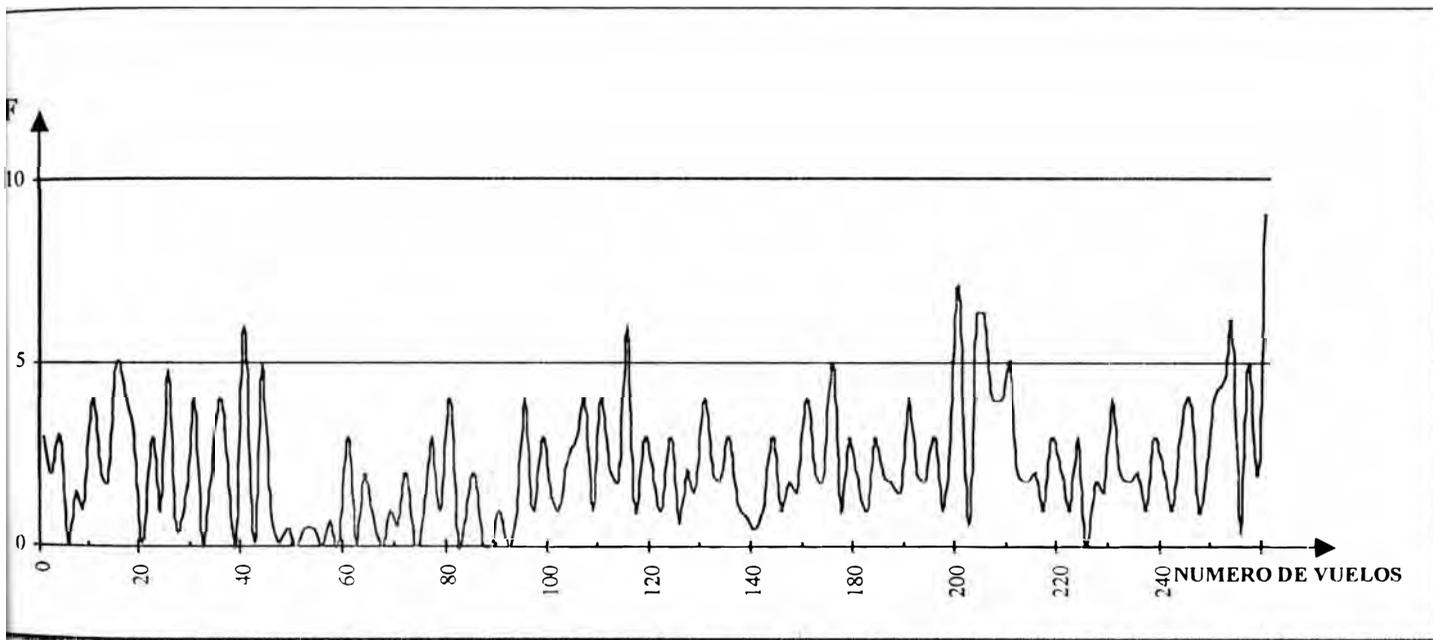
Si $\Phi > \Phi_{\max}$ - serie estacionaria (ausencia de desviación);

Si $\Phi \leq \Phi_{\max}$ - serie no estacionaria (Existe la desviación).

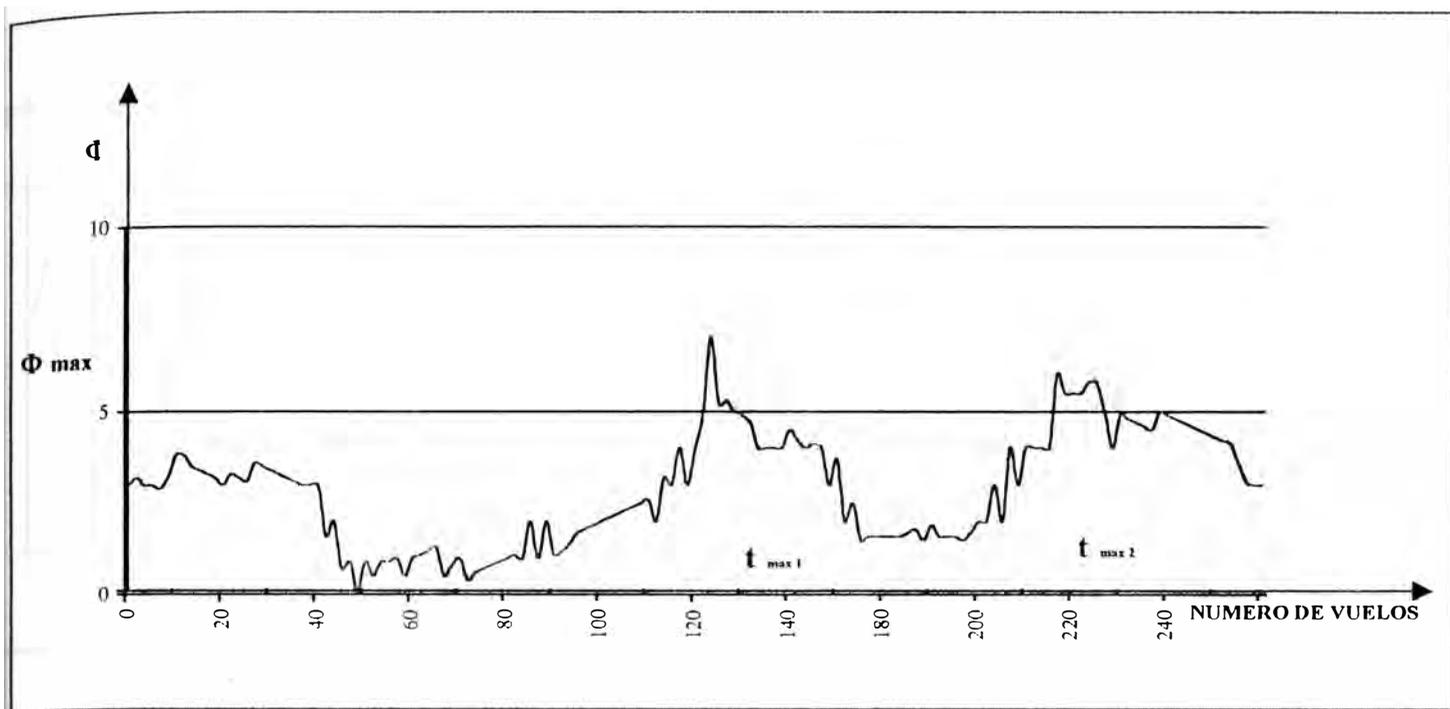
Por ejemplo. Durante el proceso de la operación del motor en regímenes estacionarios a una determinada altura y velocidad de vuelo, se registran los principales parámetros funcionales; tales como Tg - Temperatura del gas detrás de la turbina; n₁ – frecuencia rotacional del rotor de compresor también los

parámetros de las condiciones externas y del régimen de trabajo.

Por los valores de estos parámetros medidos se calcula los síntomas de diagnóstico generalizados F (fig 1a). En la (fig. 1, b) para esta serie temporal se muestra la variación de parámetro en el tiempo Φ calculado para el coeficiente de autoregresión en la realización el tramo N . Cuando $T > T_{\max 1}, T_{\max 2}$ el valor de Φ comienza a superar al Φ_{\max} , lo que de muestra sobre el origen de la desviación de la serie temporal.



a).

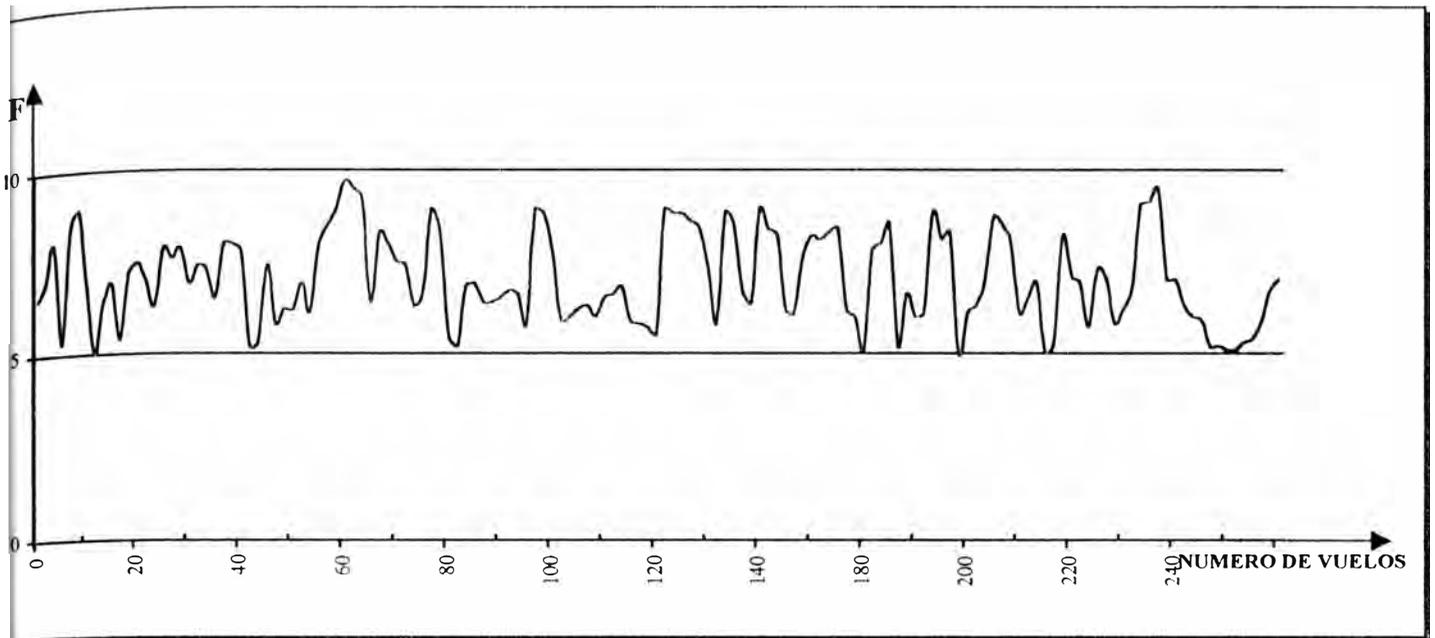


b).

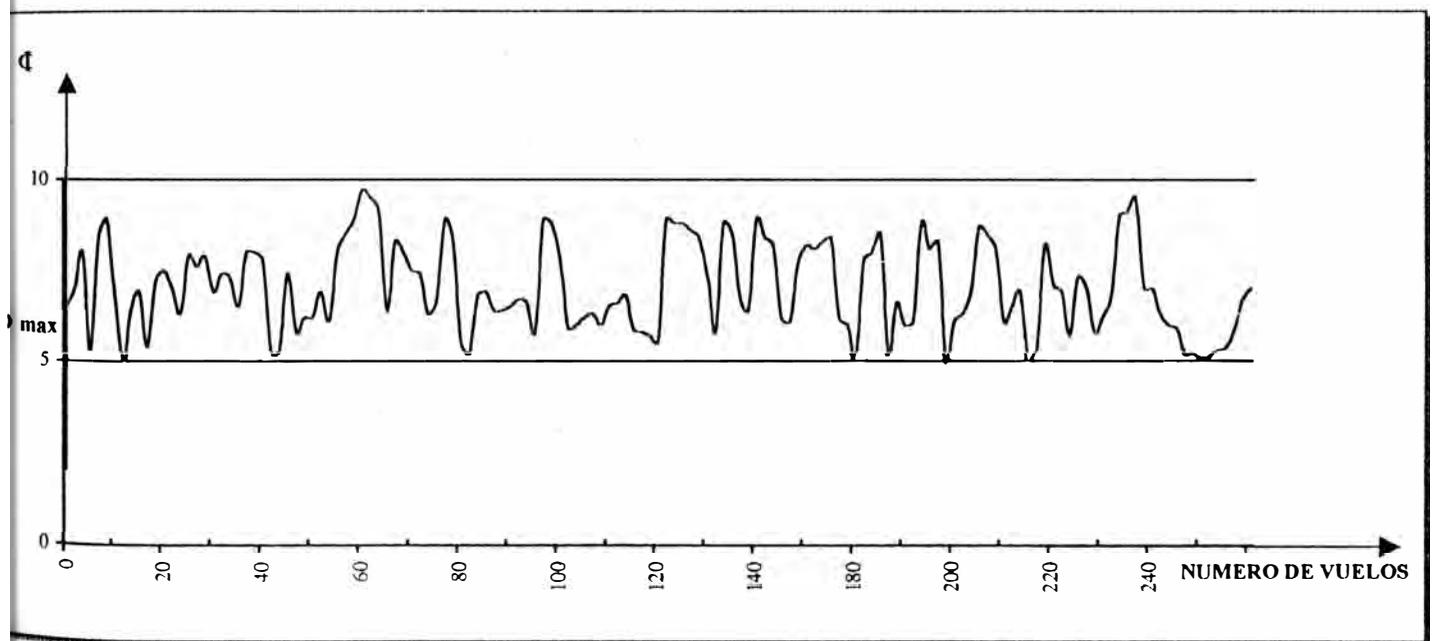
Fig. 1 VARIACION EN EL TIEMPO, EN CASO DE SU APARICION DE LAS DESVIACIONES:

a.- Señal diagnosticada F; b- Coeficiente de autoregresión logarítmica Φ

La investigación de este motor demuestró que tiene quemaduras en los álabes estatores de turbina, llegando hacia la desviación de los parámetros termo-gasodinámicos. En la fig. 2 se muestran las sucesiones temporales para F y Φ con un motor en buen estado.



a).

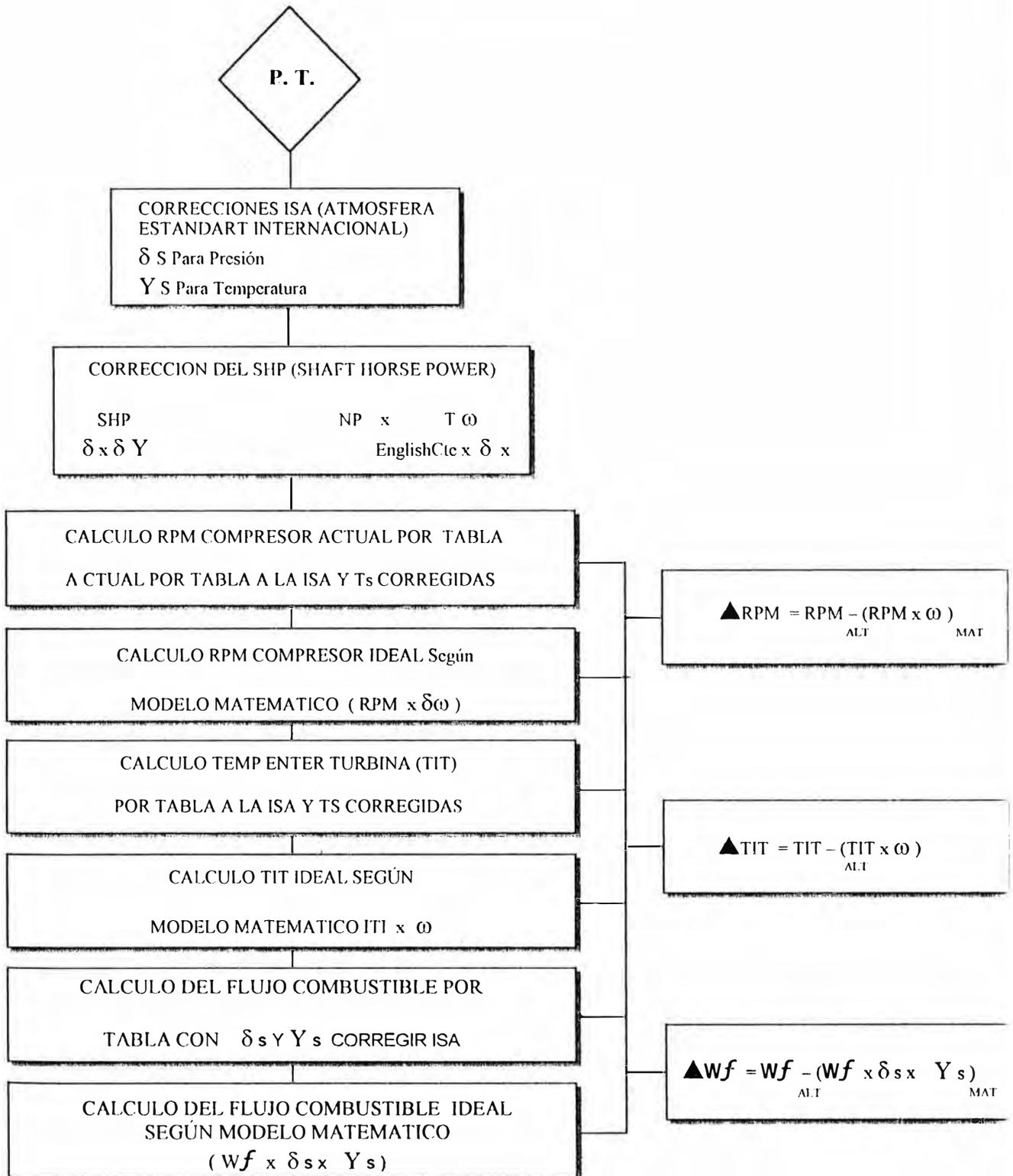


b).

Fig. 2 VARIACION EN EL TIEMPO PARA EL CASO DE UN MOTOR EN BUEN ESTADO:

a.- Síntomas del diagnóstico F ; b-Coeficiente de autorregresión Φ

2.2.- ALGORITMOS Y MODELOS PARA EL DIAGNOSTICO DE LOS MTG SEGÚN LA VARIACION DE SUS PARAMETROS FUNCIONALES Y CARACTERISTICOS



2.2.1. INTRODUCCION

Los enlaces funcionales de los parámetros del motor, que se deriva de la teoría de motores de turbina de gas condicionan la posibilidad de una descripción matemática suficientemente rígida, para describir los procesos que se producen en el motor y la utilización de modelos matemáticos para la solución de las diferentes tareas de diagnóstico. Por otro lado, los métodos paramétricos proporcionan información, que no es posible obtener por otras fuentes y solos o en combinación con otros métodos son capaces de determina no solamente el tipo de falla, si no, y el elemento del motor que está fallando aún en su fase inicial de su desarrollo. En base a una correlación significativa entre los parámetros del motor, se tiene la posibilidad de controlar no solamente la condición del motor, si no también los sistemas de medición, lo cual eleva la veracidad del proceso de diagnóstico.

Al analizar los métodos para el procesamiento en la información en vuelo a fin de realizar un diagnóstico, se puede determinar dos criterios del indicado proceso.

El primer criterio consiste en que de acuerdo a los parámetros obtenidos por medición, se apliquen modelos matemáticos para calcular el valor de otros parámetros, los cuales no se obtienen por medición, y que representan a su vez la condición interna del motor; estos valores son comparados con valores obtenidos en anterioridad por el mismo u otro modelo análogo de diagnóstico del motor o realizar la comparación de los mismos parámetros con los de otros Motores del mismo tipo que hayan operado en las mismas condiciones.

Posteriormente se analiza la información, se realiza el diagnóstico y se toma la solución que corresponda.

El segundo criterio consiste en que los valores de los parámetros obtenidos por medición, se comparen con los mismos parámetros obtenidos anteriormente también por medición, del mismo motor o con el valor promedio estático de los Motores del mismo tipo que haya estado en buen estado y bajo las mismas condiciones de operación. Como resultado de la comparación se calcula la desviación de estas mediciones, las cuales a su vez pueden ser utilizadas de dos formas.

La primera- El análisis de la variación en el tiempo de estas desviaciones permite determinar cual es la tendencia de su variación que origina el nacimiento y desarrollo de las fallas.

La segunda- Que sería otra forma de utilización de las desviaciones consiste en la introducción de estos valores en matrices conocidos como **“matrices de diagnóstico”** obtenidos por transformaciones especiales de modelos matemáticos lineales.

Con el objeto de elevar la operatividad, veracidad y la rentabilidad, el proceso de diagnóstico se organiza racionalmente en varias etapas interrelacionadas (nivel de profundidad de diagnóstico). En la primera etapa se utilizan métodos y algoritmos sencillos de diagnóstico; se determina la condición técnica que puede ser: “ motor en buen estado “ o en “condición defectuosa”. En la segunda etapa, en caso de detección de un mal estado representados en la primera etapa, se utilizan métodos y algoritmos mucho mas complejos para el diagnóstico, se determina el tipo de falla y las causas de su origen. En la tercera etapa, en caso necesario se localiza el lugar de la falla en los elementos constructivos del motor.

La forma más sencilla de evaluar la condición técnica del motor es la comparación de sus parámetros o características con las normas técnicas y sus tolerancias. Si el valor de los parámetros se encuentran dentro de los límites que indica la norma técnica, entonces se considera que el motor tiene un buen estado. Si el valor de los parámetros se encuentran fuera de los límites, entonces se considera dentro de la categoría de los ‘‘Motores defectuosos’’.

Este procedimiento frecuentemente se utiliza durante las **pruebas funcionales en banco o durante las pruebas en punto fijo**.

Sin embargo, es necesario considerar que una utilización directa de las normas técnicas, en calidad de criterio para evaluar la condición del motor no puede ser lo suficientemente efectivo, por la simple razón que los resultados del control llevan siempre consigo errores de medición y esto afecta enormemente a la hora de tomar la decisión sobre la condición del motor originando errores en el diagnóstico.

En lugar de un conjunto de parámetros unitarios, la evaluación de la condición técnica del motor puede ser determinada con ayuda de algunos parámetros generalizados. La idea de este criterio consiste en que el proceso que caracteriza a muchos componentes, se describe en base a funciones de los parámetros controlados.

$$II = f (k_y , P_y) \quad \text{donde:}$$

II- Parámetro generalizado; f-función que se escoge de acuerdo a determinados factores; k_y - coeficiente de peso; P_y - Parámetro controlado.

La desventaja para la evaluación del motor en base a los parámetros generalizados, es que el parámetro generalizado no siempre tiene un sentido físico, y representa una expresión matemática diseñado específicamente por los parámetros controlados.

O el cálculo del parámetro generalizado que si tiene un sentido físico concreto se realiza con un alto margen de error, siendo una tarea no menos difícil el cálculo de los coeficientes de peso.

Para evaluar la condición técnica del motor pueden ser utilizados los métodos de división en el espacio muestral.

Estos métodos se basan en la “ hipótesis de compatibilidad” en la cual un punto que representa el mismo estado, se agrupa en un área del espacio muestra, de tal forma que la condición del motor se puede evaluar con el vector de estado en m-coordenadas en el espacio, donde las coordenadas en el espacio son m-parámetros del motor.

La posición del vector del estado en el espacio se determinará por el área de capacidad de funcionamiento del motor. Durante la aparición de las fallas el grupo de esta capacidad varía y como consecuencia el punto (extremo del vector) en el espacio muestral se traslada y su lugar se determina por los valores de m-parámetros.

Para un diagnóstico temprano de la parte interna del motor y la localización de las fallas se puede medir e interpretar las características de las formas iniciales del mal estado pequeñas desviaciones de los parámetros aerodinámicos. Por esta razón para la búsqueda y el análisis de la relación entre las pequeñas desviaciones de los indicados parámetros es justa la utilización de modelos matemáticos lineales de la parte interior del motor.

La solución de sistemas de ecuaciones en pequeñas desviaciones permite formar diferentes matrices de diagnóstico. Los cuales representan parámetros o síntomas de estado. Éste método tiene una amplia utilización.

2.2.2.FLUJOS INFORMATIVOS DURANTE EL PROCESO Y CONTROL DE LA CONDICION TECNICA DE LOS MTG

La selección de la información sobre el mal estado, las fallas, y las obtenidas como resultado del control de la condición de los Motores deben realizarse constantemente y orientados hacia un objetivo.

La información normativa y de diagnóstico sobre la condición técnica ingresa de diferentes fuentes.

La información normativa. La cual reglamenta los síntomas que presenta un motor con normal funcionamiento, está conformada por documentación directriz en forma de ordenes técnicas, boletines de servicio, de informaciones, disposiciones, así como también los formularios, los reglamentos del mantenimiento técnico, Manuales de explotación, metódicas de diagnóstico, normas técnicas y tolerancias de los parámetros de control y otros.

La información de diagnóstico, Las cuales determinan los indicios de fallas, la información obtenida puede ser cualitativa o cuantitativa, que se obtiene durante los vuelos y durante su mantenimiento técnico.

Las fuentes de información, obtenida durante los vuelos, a través del registro de parámetros, y también los medios de control objetivo en base a cintas magnéticas de los sistemas multicanales de registro.

Los resultados obtenidos de las pruebas de los Motores, de las inspecciones, los resultados obtenidos por los distintos métodos no destructivos de control, así como de las tarjetas de fallas son algunas de las fuentes más importantes de información del motor.

La sistematización de esta amplia información, el procesamiento, análisis, interpretación y su generalización no es posible sin la utilización de los medios computarizados, la cual no puede limitarse solamente a la evaluación de la condición técnica, debe emitir las recomendaciones sobre la influencia que puede producir en las partes del motor y evaluar operativamente la confiabilidad del mismo. Estos sistemas controlan X.

2.2.3. MODELOS Y ALGORITMOS DE LOS MTG DURANTE EL CONTROL Y DIAGNOSTICO DE LA CONDICION TECNICA

Se puede suponer, que el desarrollo y el perfeccionamiento de estos sistemas, condiciona la necesidad de una automatización efectiva de diagnóstico, las cuales tendrán dos direcciones.

La primera dirección está relacionado con el desarrollo de los métodos de diagnóstico en regímenes transitorios de los MTG, los mismos que describen en forma general por la siguiente ecuación diferencial: (2.1)

$$\left. \begin{aligned} a_n d^n Y / d t^n + a_{n-1} d^{n-1} Y / d t^{n-1} + \dots + a_1 dY / dt + a_0 Y = \\ b_m d^m X / d t^m + b_{m-1} X / d t^{m-1} + \dots + b_1 dX / dt + b_0 \end{aligned} \right\} (2.1)$$

donde Y y X - parámetros de entrada y salida; t- tiempo actual; a y b - constantes de la ecuación; n y m grados polinomios.

Los procesos transitorios se caracterizan por los altos niveles de información entrópica. Por eso los modelos de diagnóstico, descritos por la ecuación (2.1), serán más informativos que los modelos matemáticos descritos por las ecuaciones diferenciales para procesos estabilizados:

(2.2)

$$a_n Y^n + a_{n-1} Y^{n-1} + \dots + a_1 Y + a_0 = b_m X^m + b_{m-1} X^{m-1} + \dots + b_1 X + b_0 \quad \} \quad (2.2)$$

Esta dirección esta relacionada a mantener las posibilidades para la modelación matemática de acuerdo a la ecuación (2.1), lo que exige la creación de nuevos sistemas de registro automatizados de los parámetros que varían rápidamente en el tiempo y de los procesos transitorios intermitentes.

Los métodos de diagnóstico de la dirección aún se encuentran en el período de elaboración.

Esto especialmente se relaciona al distinguir las fallas por los síntomas cualitativos tales como los ruidos extraños en el motor durante su arranque y durante el giro de los rotores, el ruido y la vibración durante un stoll por corto tiempo, y otros. Sin embargo la utilización del modelo ergonómico está limitado. Esto esta relacionado con las particularidades biológicas del hombre, su experiencia y entrenamiento. Un hombre de experimento con buen entrenamiento puede determinar rápidamente según el ruido y vibración del motor la frecuencia de rotación con un error no mayor de 2% mientras que, uno menos entrenado, lo determinara con un error de 8 – 10%.

En la formación de los modelos de información-medición intervienen dos flujos de información: de control por medición y de diagnóstico. La diferencia principal entre ellos consiste en que en el primer flujo la información se conforma de los resultados de las mediciones directas, y en el segundo como resultados de las transformaciones especiales del primero.

La cantidad y calidad de las informaciones del control por medición se condicionan de acuerdo a la capacidad de control del MTG y del diagnóstico por las posibilidades cuantitativas y cualitativas de los sistemas de registro de parámetros, la cual determina el valor del diagnóstico y la cantidad de la información de salida.

La representación de la información de salida en el primer caso son los indicadores numéricos sistema de control por medición, las señales y las letras del texto: En el segundo son las comunicaciones del diagnóstico, la locación y los indicios de las fallas, los pronósticos, los cuales se representan en números, códigos, gráficos, letras de los textos y otros.

En los modelos de información por medición también se introduce información sobre ciertos controles principales de valores límites y permisibles así como los síntomas de diagnóstico. Todos los valores límites y permisibles en forma de números se registran en tablas, fórmulas y gráficos, los cuales se aportan a los documentos Técnico – Normativos: Manual de Operaciones de vuelo y el Manual de Mantenimiento Técnico, boletines de explotación, introducciones, metódicas, etc.

Uno de los cambios para la modernización del modelo de información por medición es el traslado de las fallas paramétricas no evidentes a evidentes con ayuda de los modelos matemáticos en base a las ecuaciones (2.1) y (2.2).

La determinación del tipo de la condición técnica en este caso se realiza con ayuda de los modelos de diagnóstico evidente y no evidente.

Los modelos de diagnóstico evidentes se conforman de un conjunto de sistemas de modelos matemáticos evidentes de todas las posibles condiciones técnicas del objeto de diagnóstico;

$$Y_{med.ij} = A_{ij} (X_{med.ij}, B_{ij}) \quad (2.3)$$

Donde Y_{med} y X_{med} – parámetros de la entrada y salida del proceso de trabajos; i - tipo de la condición técnica; j - número de las posibles combinaciones de los factores climatológicos; Operador de las acciones matemáticas sobre los parámetros variables medidos; B factores climatológicos y factores estáticos no determinados.

La cantidad de modelos matemáticos (2.3) es igual a la suma de combinaciones j - combinaciones de factores climatológicos, i - condición técnica es decir prácticamente no está limitado. Por esta razón de los modelos matemáticos es necesario hacer que estos modelos sean independientes (invariables) de los factores climatológicos, es decir llevar los parámetros medidos a parámetros semejantes Y_o y X_o . En este caso el modelo matemático toma la siguiente forma:

$$Y_{oi} = A_i (X_{oi}, B_i), \quad (2.4)$$

Donde o - índice de las magnitudes semejantes, que más adelante se omitirán, a excepción de algunos casos para la simplificación de la escritura.

El modelo matemático evidente (2.4) propone que, las características estáticas j - x de los factores indeterminados son conocidos para cada i - x tipo de condición técnica, y su influencia sobre los parámetros de salida se puede considerar las tolerancias en su valor nominal:

$$Y_i \pm \Delta Y = A_i (X_i), \quad (2.5)$$

Donde ΔY – tolerancia

En un modelo matemático evidente compuesto de un conjunto de sistemas de modelos matemáticos evidentes (2.5), la regla para la toma de decisión consiste en la elección del operador del tipo de la técnica dada i - condiciones, en la cual los valores reales variables llegan a ser iguales a los estolones, calculados por las ecuaciones (2.5). Es decir :

$$|Y'_i - Y| \leq |\Delta y| \quad \text{cuando } x' = x \quad (2.6)$$

donde i – índice del valor patrón variable.

El modelo de diagnóstico no evidentes de conforman de un modelo matemático evidente, que describe como regla genera una de las condiciones de buen estado (estalon) y la correcta toma de decisión.

El modelo matemático evidente de un modelo de diagnóstico no evidente (2.4) para un buen estado, representado en forma de terminativa:

$$Y = A(x); \quad (2.7)$$

Es decir, la forma en la cual no están presentes los factores indeterminados.

La regla para la toma de decisiones se conforma de los siguiente: Por el modelo matemático evidente dado (2.6) cuando los valores patrones del argumento, es igual a los reales, se calcula el valor patrón de la función:

$$Y' = f(X' = X); \quad (2.8)$$

El valor patrón de la función se compara con las reales

$$Y - Y' = Y - f(X') = \Delta y, \quad (2.9)$$

Donde $\Delta y = y - y'$ desviación del diagnóstico, es decir la diferencia entre los valores variables y reales.

Cuando $|\Delta y| \leq |D_i|$ - La condición técnica se considera invariable, y cuando $|\Delta y| > |D_i|$ se considera variable, D_i - límite de la tolerancia de la condición técnica.

El margen de error para la determinación de la desviación del diagnóstico depende de la precisión de las mediciones, del registro, de los métodos de procesamiento estadístico y de los métodos de transformación de las magnitudes medidas en los parámetros semejantes, también de las condiciones de trabajo de los MTG.

2.2.4. FUNDAMENTOS METODOLOGICOS DEL DIAGNOSTICO PARAMETRICO DE LOS MTG

Los fundamentos metodológicos de diagnóstico propuesto se basan en la utilización de modelos de diagnóstico no evidente, compuestos de modelos matemáticos del buen estado del motor en los regímenes estabilizados y de algoritmos de reconocimiento de estados diferentes al anterior.

2.2.4.1. Elección del régimen de trabajo del motor para objeto del diagnóstico

Como es conocido, la utilización de los síntomas más informativos del estado mantiene una **alta efectividad** del método de diagnóstico. La información de los síntomas dependen de la entropía del estado del motor y la elección del régimen de trabajo para el diagnóstico. La entropía en este caso se presenta como la medida de los procesos irregulares que se producen en el motor. Los procesos más irregulares corresponden a una mayor entropía del estado, y por consiguiente, una alta informatividad.

En este sentido la mayor entropía posee los regímenes transitorios del motor: El arranque, la aceleración, el accionamiento del sistema de reserva y otros. Sin embargo la utilización de los regímenes transitorios como objeto del diagnóstico está limitado en vista de la ausencia de transformadores primarios confiables sin inerciabilidad y de los correspondientes equipamientos de registros en la explotación de los Motores. Por otro lado, los métodos de análisis de los parámetros poco desarrollados por lo tanto juzgar sobre su utilidad práctica por el momento es prematuro.

Por esta razón, para el objeto del diagnóstico en la actualidad es oportuno utilizar los regímenes estabilizados (estacionarios) del motor. El régimen de despegue (despegue) posee la más alta información entrópica entre todos los regímenes estacionarios, pero la utilización de este régimen para la etapa del despegue y toma de altura de la aeronave lo convierte en un régimen medio estacionario y para el diagnóstico se hace necesario el registro automático de los parámetros del motor en las variables condiciones de vuelo.

El diagnóstico también se dificulta por el trabajo en el indicado régimen de los diferentes limitadores del motor. En el régimen de Marcha lenta en vuelo y en el régimen nominal también se aplican limitaciones análogas.

De esta forma, los regímenes más informativos, los cuales, son recomendable para fines del diagnóstico, **el régimen de crucero del motor**. Estos regímenes son cómodos para la tripulación, por cuanto tienen la posibilidad de registrar en forma manual todo lo necesario para el diagnóstico de los parámetros, si no está equipado de un sistema altamente efectivo del control objetivo o no todos los parámetros necesarios son registrados por este sistema.

Otro asunto importante para el incremento de la efectividad del sistema de diagnóstico es la elección de las condiciones de registro de dicha información. Por cuanto el estado térmico del motor se determina por los parámetros del proceso de trabajo. Así como las características geométricas del conducto gas-aire, entonces una inestabilidad térmica en el momento del registro altera a la información para el diagnóstico y disminuye considerablemente la veracidad del mismo.

El tiempo mínimo de trabajo del motor t en el régimen uniforme, utilizado para el diagnóstico, al término del cual se debe registrar la información, consiste en la suma de tiempos t_y desde el traslado de la palanca de modo del motor (PMM) a una nueva posición y con el tiempo t_m hasta la estabilización térmica del motor, originados por la inercialidad de los procesos de transferencia de calor entre los flujos de gases, del medio ambiente y los elementos constructivos es decir:

$$t = t_y + t_m$$

El tiempo de puesta de la PMM se realiza $t_y > (1-2)$ seg. y el tiempo de estabilización del estado térmico en 1-2 veces mayor que t_y . Considerando que el tiempo de registro de los parámetros en forma manual se realiza de 360 seg, entonces el tiempo requerido de trabajo del motor en el régimen de diagnóstico debe ser no menor de 5-6 Min.

Sin embargo, la utilización directa de los parámetros, medidos en el régimen estabilizado del motor para los fines del diagnóstico es poco efectivo, por cuanto se excluye la posibilidad de comparar estos parámetros con las distintas etapas del diagnóstico. Para la realización de tal comparación estos parámetros deben estar convertidos a condiciones externas semejantes y a un régimen gaso-dinámico semejante, lo que excluye su influencia en los resultados del diagnóstico en condiciones externas, las condiciones de vuelo del régimen de trabajo del motor.

2.2.4.2. Regímenes semejantes de trabajo del motor

Como es conocimiento en la dinámica de los gases y en la teoría de los Motores de turbina de gas, las corrientes de gas uniformes son semejantes, si durante la corriente de los cuerpos geométricos semejantes, las relaciones de las presiones, las velocidades y las temperaturas en cualquier punto concordante de los flujos resultan ser iguales y los vectores de velocidad, son igualmente orientados relativos a los cuerpos fuselados.

La determinación las condiciones mínimas necesarias, en la cual se mantienen la semejanza es una tarea práctica muy importante. En la teoría de semejanza se demuestra, que se incluye la observación de semejanza de las condiciones límites e iniciales, además la invariabilidad de una serie de valores anteriores sin unidades. Siendo los más importantes los siguientes:

- ◆ El número Mach $M = C / \sqrt{k.r.t.}$, caracteriza por el grado influyente de la compresibilidad del gas en la estructura del flujo;
- ◆ El número de Reynolds $Re = cl \rho / \mu$, se caracteriza por el grado influyente de la viscosidad del gas;
- ◆ El número de Froude $Fr = C^2 / (ql)$, se caracteriza el grado influyente de la fuerza de gravedad;
- ◆ El número de Nusselt $Nu = \alpha l / \lambda$, caracteriza el grado influyente del intercambio térmico;
- ◆ El número de Strouhal $Sh = 1 / (c \tau)$, caracteriza el grado influyente del flujo no estacionario;
- ◆ El número de Prandtl $Pr = Cp \mu / \lambda$, y el indicador adiabático $K = Cp / Cv$, caracterizan las propiedades físicas del gas.

En la práctica de la ingeniería se hace necesario tomar los criterios más importantes y despreciar a los demás. Así, en ausencia de flujos turbulentos no estacionarios en la entrada al motor, despreciando la influencia de la fuerza de gravedad en el flujo del gas y en los elementos de los MTG y la influencia del intercambio térmico interno, así como también, considerando, que

en las distintas condiciones de vuelo la variación de los coeficientes adiabáticos para el aire y el gas es pequeño y el valor del número de Reynolds en estos casos es mayor de 3.10, es decir el flujo se encuentra en forma de automodelo, entonces en los cálculos de ingeniería, es posible la variación de los números Re, Fr, Nu, Sh, Pr y se pueden despreciar.

De esta forma para la realización de la semejanza del flujo de gaseosos, en elementos geométricos semejantes de los MTG en regímenes estacionarios, deben cumplirse las siguientes condiciones: Para los compresores y turbinas, la invariabilidad de los números $M = \text{const}$ representa la condición de semejanza del flujo gasodinámico en sus movimientos absolutos y relativos; Para los dispositivos de entrada, se mantienen constantes M_{II} y M a la salida; Para los elementos de los MTG. Que tienen forma de canales (la tobera, el difusor), en alguna sección característica M se mantiene constante, etc.

Un significado práctico importante, y en particular para objetos del diagnóstico de los MTG, tiene los regímenes semejantes en el trabajo del gasogenerador del motor, es decir todos los elementos, distribuidos desde la entrada al compresor hasta la sección crítica de la tobera de salida.

Así, para un motor turboreactor de un solo eje (MTR), con caídas supercríticas de presión en la tobera de salida, es decir durante las condiciones $Mr = 1$, la igualdad de sus frecuencias de giro representa el único criterio del generador, es decir

$$Mr = \frac{Cr}{a_h} = \frac{Dn}{30 \sqrt{kRT_{II}}} \sim n / \sqrt{T} = No = \text{const.}$$

donde: Cr - velocidad rotacional, a_h - velocidad del sonido, k - coeficiente adiabático, Dn - diámetro calculado.

La suficiente de esta condición se demuestra durante el trabajo conjunto de los elementos del gasogenerador. En el caso indicado la semejanza de los regímenes se mantiene la invariabilidad de la distribución de los puntos de trabajo en las características del compresor y turbina (caso $\pi = \text{Cost}$) y por consecuencia la igualdad q (λ_o), π_R , π_T , T_o/T_M , η_k , η_T -(función gasodinámica, grado de aumento o disminución de la presión, relación de temperaturas, coeficientes de rendimiento) y otras magnitudes relativas.

Examinando la condición del trabajo conjunto del gasogenerador de los MTR de los dos ejes se puede hacer las siguientes deducciones:

- ◆ La condición del trabajo del compresor de alta presión (CAP), la cámara del combustión y la turbina de alta presión (TAP) en nada se diferencia de la condición del trabajo conjunto de los elementos del gasogenerador de un MTR de un solo eje;
- ◆ El régimen de trabajo del compresor y la turbina y la turbina del rotor de baja presión, en las condiciones indicadas, depende únicamente del régimen de trabajo del gasogenerador de alta presión.
- ◆ Durante las caídas supercríticas de presión en la tobera de salida no regulable de un MTR de los ejes, la posición de la línea de trabajo en el CBP así como en el CAP, no depende del régimen de vuelo ni de las condiciones atmosféricas.

De esta forma, cuando $M_{cr} = 1$, el único criterio, que determina la semejanza de los regímenes del gasogenerador del MTR de dos ejes, es la igualdad de frecuencias semejantes de rotación de uno de los rotores, es decir:

$$N_{ap} = \text{const}, \text{ ó } N_{bp} = \text{const}. \quad (2.11)$$

Comparativamente se puede demostrar en forma sencilla, que para Motores turbo-fan (MTF), sin la disminución de los flujos con caídas supercríticas de presión en las toberas no regulables de los ductos exterior e interior, en forma análoga los MTR de doble eje, el único criterio que determina la semejanza de los regímenes de trabajo del gasogenerador, es la igualdad de frecuencias semejantes de rotación de uno de los rotores, es decir la condición (2.11).

Con las caídas subcríticas de presión en las toberas, las cuales pueden observarse en los regímenes de reducción ó en Motores con alto grado de derivación, es necesario considerar la variación de π_T

Para MTF con combinación de los flujos utilizando la condición d igualdad de consumos a través de la sección del motor – turbo – hélice (MTH) y por la sección de tobera del ducto de alta presión, se puede obtener de la siguiente ecuación:

$$\pi = \text{const. } q(\lambda_1) F_1 T_{bp} \left[\frac{2n}{n+1} \right] \quad (2.12)$$

Por cuanto en la sección de la tobera, por regla general, no hay una caída crítica de la presión; el valor de $q(\lambda_1)$ varía con la modificación de las condiciones de trabajo del motor, lo que coacciona una variación de $\pi_{T_{bp}}$. De esto se deduce que, en diferencia de los MTR de doble eje sin variación de la geometría del dispositivo de salida de inclusive con una caída supercrítica de presión en la tobera no regulable, en los MTF con combinación de flujos, el grado de disminución de la presión del gas en la turbina varía con la modificación de las condiciones del vuelo y del régimen de trabajos del MTF con combinación de flujos.

Por lo anteriormente, para objeto del diagnóstico del MTF con combinación de flujos se pueden sacar conclusiones importantes: Una condición necesaria de semejanza de los regímenes de trabajo del gasogenerador del indicado tipo de motor, con un programa de regulación determinado ($n_{ap} = \text{const}$) es la igualdad de dos criterios de semejanza es decir:

n_{apo} y n_{bpo} es decir:

$$\begin{aligned} n_{apo} &= n_{ap} / \sqrt{\frac{288}{T_{11}}} = \text{const} \\ n_{bpo} &= n_{bp} / \sqrt{\frac{288}{T_{11}}} = \text{const} \end{aligned} \quad (2.13)$$

En este caso la semejanza de los regímenes se mantiene por la invariabilidad de la distribución de los puntos de trabajo en las características de los compresores y turbinas.

Cabe indicar que, es muy importante para el diagnóstico de los MTG que las características gasodinámicas de regímenes semejantes de trabajo del motor, consiste en que cualquier relación sin unidades de los parámetros del flujo de gas, tomados de las correspondientes secciones distribuidos en el motor, se conservan invariables, es decir:

$$\frac{P_i}{P_{1i}} = \text{const}; \quad \frac{T_i}{T_{1i}} = \text{const}; \quad \frac{C_i}{\sqrt{T_{1i}}} = \text{const};$$

$$M_{1i} = \text{const. } \eta_z = \text{const.} \quad (2.14)$$

Donde $-i$ es el índice de una sección arbitraria del motor, y z -cualquiera de sus elementos.

Utilizando las principales características de los regímenes semejantes y en particular en la relación (2.14), se puede encontrar la relación entre los parámetros del motor en los regímenes semejantes, es decir;

$$G_a \sqrt{P_1/P_{1i}} = G_{a0} = \text{const}; \quad R/P_{1i} = R_0 = \text{const};$$

$$R_a = R_{a0} = \text{const}; \quad C_a / \sqrt{T_{1i}} = C_0 = \text{const}; \quad (2.15)$$

$$G_c / P_1 \sqrt{T_{1i}} = G_{c0} = \text{const}; \quad \text{etc.}$$

Donde G_a - consumo de aire, e - valor específico de los parámetros G_n, R_a, G_c .

Las relaciones obtenidas se llaman parámetros semejantes (ó parámetros de semejanza) los regímenes semejantes se conservan constantes. Como consecuencia de lo mencionado se puede deducir que los parámetros de semejanza es decir la relación (2.15) son funciones del criterio de semejanza.

Cabe indicar que, la semejanza de los regímenes de los MTG se realiza en forma aproximada, sin embargo, aceptarlo no conduce a errores significativos por lo tanto, la teoría de la semejanza puede utilizarse en forma ventajosa para los fines del diagnóstico de los MTG.

De esta forma, en base a lo mencionado se puede formular los siguientes principales puntos, basados en el método propuesto para el diagnóstico, que se deduce de la teoría de la teoría de las semejanza.

El motor (o el menor su parte interna conducto gas-aire) se encuentra en un buen estado, mientras se conserve la semejanza de los flujos gaseosos en el régimen gasodinámico semejante de trabajo del motor. La conservación de la semejanza de los flujos, en este caso, se controla por los parámetros semejantes invariables del motor en los regímenes gasodinámicos semejantes.

Por cuanto las corrientes de los flujos de gas dependen de la condición tanto de los elementos del conducto gas-aire, así como de los elementos del motor que influyen en el correcto funcionamiento de los rotores, los mismos que podrían ser; Los elementos de transmisión del motor, de mando, mecanismos y algunos sistemas, etc. Es decir en el caso mas general, la variación de la condición del motor se observa como la variación de las semejanzas geométrica de la parte interna del motor ocasionando la variación de la semejanza de los flujos gaseosos.

2.2.4.3. Modelos matemáticos no evidentes de los MTG

Analicemos el principio y la regla de estructuración del modelo matemático no evidente del motor, por ejemplo en el MTF con combinación de flujos de doble eje. El propuesto modelo matemático no evidente destinado para la descripción de la condición técnica del motor, en el cual se observa la semejanza geométrica de sus elementos y mantiene la semejanza de la corriente de los flujos gaseosos en los regímenes gasodinámicos semejantes de trabajo.

En caso general, el modelo matemático de la condición técnica del indicado motor, se basa en las características principales de los regímenes semejantes gasodinámicos de trabajo del motor y representa una serie de conjuntos de funciones de parámetros semejantes del proceso de trabajo, cuyos argumentos de estos sirve de criterio de semejanza de los regímenes de trabajo del motor.

Analíticamente, utilizando la condición de semejanza de los regímenes, el modelo matemático puede ser expresado por un conjunto de funciones de la forma:

$$X_{j_0} = f_j (n_{AP_0}, n_{BP_0}) \quad (216)$$

Donde X_{j_0} – parámetro semejante de trabajo del motor, es decir uno de los parámetros de la expresión (2.14) ó (2.15); n_{AP_0} y n_{BP_0} -criterio de semejanza de los regímenes de trabajo del MTF de doble eje de la condición (2.15).

Por cuanto X_{jo} representa una función de dos argumentos n_{ap0} y n_{bp0} , entonces la interpretación gráfica en coordenadas tridimensionales rectangulares representa la característica funcional en tres dimensiones del MTF de doble eje. (fig 4) . en otras palabras el modelo matemático del indicado motor en buenas condiciones posee una característica muy importante para el diagnóstico que consiste en que independientemente del parámetro de semejanza o su coeficiente de rendimiento de prueba tomar como X_{jo} (T_o , G_o , π_K , η_Z , etc.) en la expresión (2.16), su proyección en el plano n_{AP0} y n_{BP0} van a estar ubicados en una sola línea de función $n_{AP0} = f(n_{BP0})$ la cual en forma condicional se le puede llamar como la línea de desplazamiento de ejes. Si es que a través de esta línea se traza un plano (en caso general una superficie), la normal al plano $n_{AP0} - n_{BP0}$, entonces en esta línea se poseionarán todo el conjunto de funciones

(2.16) y que asu vez se le puede llamar como el plano (en el mejor de los casos superficie) de buena condición del motor.

Si desde el inicio de eje coordenada (fig.3) en el plano $n_{AP0} - n_{BP0}$ trazar líneas iguales a los deslizamientos de ejes, es decir, líneas en las cuales se cumple la condición:

$$n_{AP0} / n_{BP0} = S_1 = \text{const},$$

Interpretación Gráfica de las Características Funcionales en Tres Dimensiones

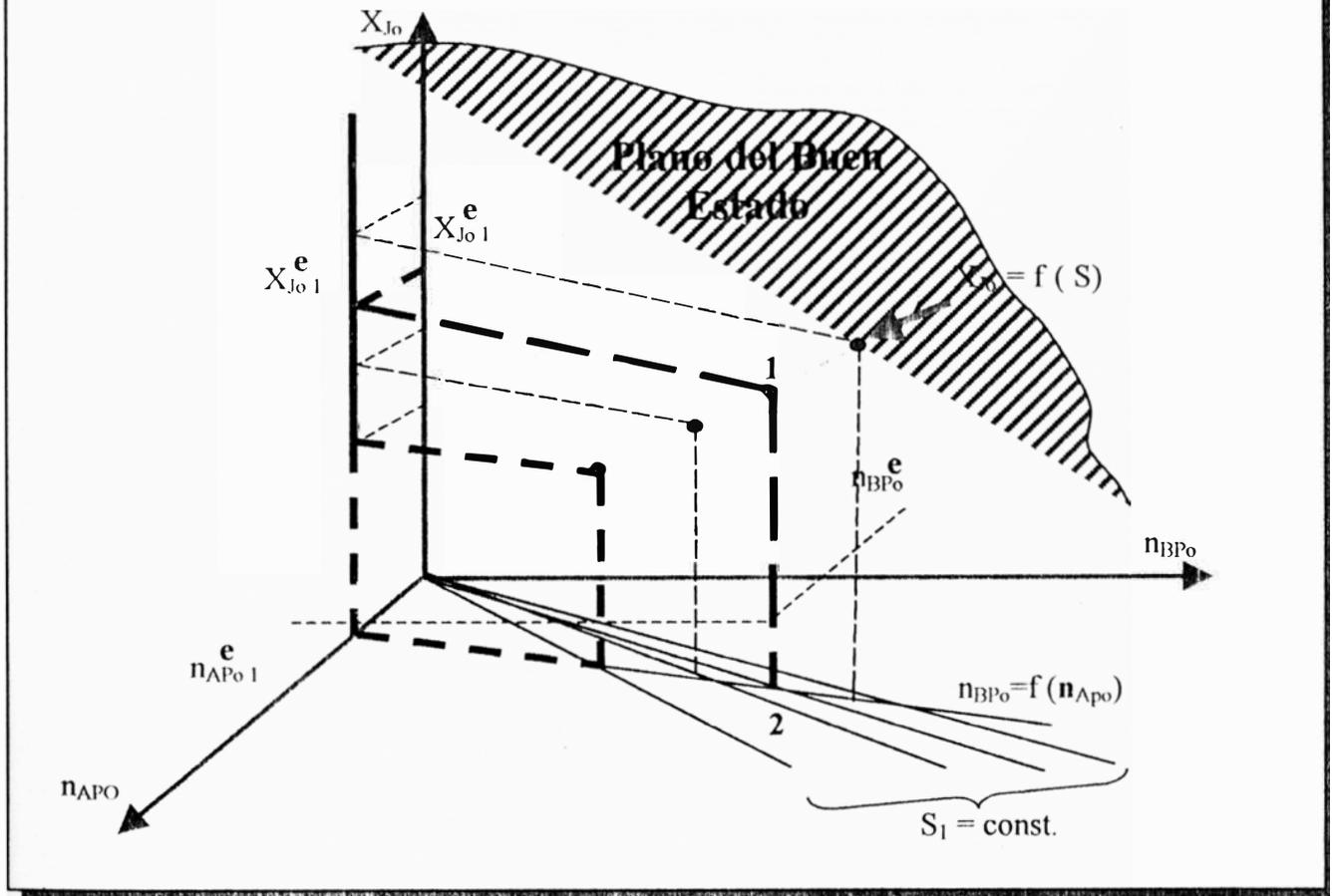


Fig 3

Entonces en cada punto de intersección de las funciones $n_{APo} = f(n_{BPo})$ con $S_1 = \text{const}$. Esto significa, que la condición de los regímenes de trabajo del motor.

$$n_{APo} = \text{const y } n_{BPo} = \text{const,}$$

Con un programa de regulación del motor $n_{AP} = \text{const}$ puede ser cambiado por un único criterio de semejanza.

$$S \quad n_{APo} / n_{BPo} = \text{const},$$

La oportunidad de este enfoque se explica, en que por un lado, la unidad del criterio de semejanza de los regímenes de trabajo del motor simplifica la descripción del modelo matemático uno en buen estado. De otro lado, la S según su naturaleza refleja la distribución de la energía entre los rotores aportado al motor por medio del combustible, el cual es síntoma importante de diagnóstico, el no considerarlo disminuye la capacidad informativa del modelo de diagnóstico.

De esta forma, la función (2.16), teniendo en cuenta el paso a un criterio unificado de semejanza de los regímenes de trabajo del MTF de doble eje, se transforman en la función del tipo:

$$X_{io} = f_i(S) \quad (2.17)$$

Considerando que, representa una función de dos argumentos n_{APo} y n_{BPo} , entonces se puede escribir:

$$S = f_a(n_{APo}) = S_a \quad \text{y} \quad (2.18)$$

$$S = f_b(n_{BPo}) = S_b, \quad (2.19)$$

Donde el índice a-alto (superior), b-bajo (inferior)

Lo que para un motor con buen funcionamiento es equivalente, ya que S_a y S_b determinan el mismo punto en la línea de deslizamiento de ejes, es decir la función $n_{APo} = f(n_{BPo})$ (fig 3).

Pero en el caso de una desviación del estado real del motor con respecto a uno con buen funcionamiento, caso general como consecuencia de la variación de semejanza geométrica del motor o por otras causas, ocasiona una distribución de la energía entre rotores y tendrá lugar la desigualdad $S_a \cong ; S_b \cong S$. Por tal motivo las funciones (2.18) y (2.19) puede ser solucionado y la tarea inversa, es decir teniendo el valor del criterio único de regímenes decir teniendo el valor del criterio único de regímenes semejantes S , se puede calcular los valores correspondientes a n_{AP_0} y n_{BP_0} es decir.

$$n_{AP_0} = f_{AP} \quad (2.20)$$

$$n_{BP_0} = f_{BP} \quad (2.21)$$

Las funciones (2.17), (2.18), (2.19), caracterizan el buen estado del motor y se sitúan en el plano del buen estado asimismo, las funciones (2,20) y (2,21), son las llamadas estolones (patrón) y se indicarán con el superíndices “e”. En los regímenes mayores al accionamiento de la mecanización del compresor las funciones (2.17), (2.18), (2.19), (2.20) Y (2.21) representa funciones uniformes y continuas que solamente se incrementan o decrecen, los cuales se describen por los polinomios de n grados.

De esta forma, el modelo matemático de un MTF de doble eje de buenas condiciones técnicas, en forma analítica representa el siguiente conjunto de funciones de parámetros semejantes del proceso de trabajo del motor, es decir,

$$S_i = S_i^e = \frac{n_{BP_0}}{n_{AP_0}}, \quad (2.22)$$

$$n_{BPoi}^e = a_{10} + a_{11} S_1 + a_{12} S_1^2 + \dots = \sum_0^n a_{1n} S_1^n; \quad (2,23)$$

$$n_{APoi}^e = a_{20} + a_{21} S_1 + a_{22} S_1^2 + \dots = \sum_0^n a_{2n} S_1^n; \quad (2,24)$$

$$S_{bi}^e = a_{30} + a_{31} n_{BPoi} + a_{32} n_{BPoi}^2 + \dots = \sum_0^n a_{3n} n_{BPoi}^n; \quad (2,25)$$

$$S_{ai}^e = a_{40} + a_{41} n_{APoi} + a_{42} n_{APoi}^2 + \dots = \sum_0^n a_{4n} n_{APoi}^n; \quad (2,26)$$

$$X_{joi}^e = a_{50} + a_{51} S_1 + a_{52} S_1^2 + \dots = \sum_0^n a_{5n} S_1^n; \quad (2,27)$$

$$X_{jobi}^e = a_{50} + a_{51} S_{bi}^e + a_{52} S_{bi}^{e2} + \dots = \sum_0^n a_{5n} S_{bi}^{en}; \quad (2,28)$$

$$X_{joai}^e = a_{50} + a_{51} S_{ai}^e + a_{52} S_{ai}^{e2} + \dots = \sum_0^n a_{5n} S_{ai}^{en}; \quad (2,29)$$

donde i- es el índice de la etapa del diagnóstico; a- coeficiente polinómico.

Durante el diseño del modelo matemático para el motor se utilizan las siguientes funciones para su conversión al sistema automatizado del mando (SAC):

Para las frecuencias de rotación:

$$n_{oi} = n_i / \sqrt{T_{II}^*}$$

Para la temperatura del gas (aire):

$$T_{oi}^* = T_i^* / T_{IIi}^*$$

Para la presión del gas (aire):

$$P_{oi}^* = P_i^* / P_{IIi}^*$$

Para el consumo de combustible:

$$B_{toi} = B_{ci} / (P_{II}^* \sqrt{T_{II}^*})$$

$$\text{Donde } T_{IIi}^* = T_{II}^* + 273^\circ$$

$$P_{IIi}^* = 760 (1 - 0.02257 \cdot H_i) 5.256 (1 + 0.2M^2)^{3.5}$$

Cabe indicar, que en función a la fuente de información, en cuya base se diseña el modelo matemático para un motor en buen estado es decir se determina los coeficientes polinómicos (2.23)..(2.29), el mismo que puede dividirse en:

La media estadística, elaborado por los datos generales de las características funcionales o la media estadística de las pruebas funcionales en banco de un grupo de Motores del mismo de un determinado número de motor o por los formularios de un determinado número de motor o por los datos de sus pruebas en tierra en su explotación durante las condiciones de estabilidad térmica del motor.

2.2.4.4. Desviaciones de los síntomas de diagnóstico

Los parámetros semejantes de trabajo del motor, que caracterizan su condición técnica utilizados en forma determinada en el modelo de diagnóstico los llamaremos síntomas de diagnóstico.

Si durante el proceso de explotación del motor, en razón del desarrollo de algunas defectuosidades, ocasiona como consecuencia la variación de su semejanza geométrica o la redistribución de la energía aportada al motor por los rotores a consecuencia de la variación de la eficiencia de sus elementos, lo que a su vez, conduce a la variación de la semejanza de corrientes de flujos gaseosos, entonces el punto 1 con coordenadas X_{i0i} , n_{AP0i} y n_{BP0i} , que caracterizan el estado del real del motor, su desvío del plano del buen estado. (fig 4).

El punto 2 (fig.4) representa la proyección del punto 1 en el plano n_{AP0} n_{BP0} y determinan el valor real del deslizamiento de ejes iguales a $S_i = n_{BP0i} / n_{AP0i}$

Utilizando la línea de deslizamiento iguales a $S_i = \text{const}$, se puede determinar el punto 3, es decir un punto en la línea escalón del desplazamiento de ejes S_i con un valor igual deslizamiento real:

$$S_i = S_i = n_{AP0}^e / n_{BP0}$$

Utilizando las funciones (2.23) y (2.24) se determinan los valores para n_{AP0i} y n_{BP0i} es decir, el valor de las frecuencias de giro de los rotores cualquiera que fuesen en el caso del buen estado del motor con un deslizamiento real de los rotores igual a S_i (Fig 4, puntos 3^0 y 3^1).

Interpretación Gráfica del Cálculo de las Desviaciones del Diagnóstico

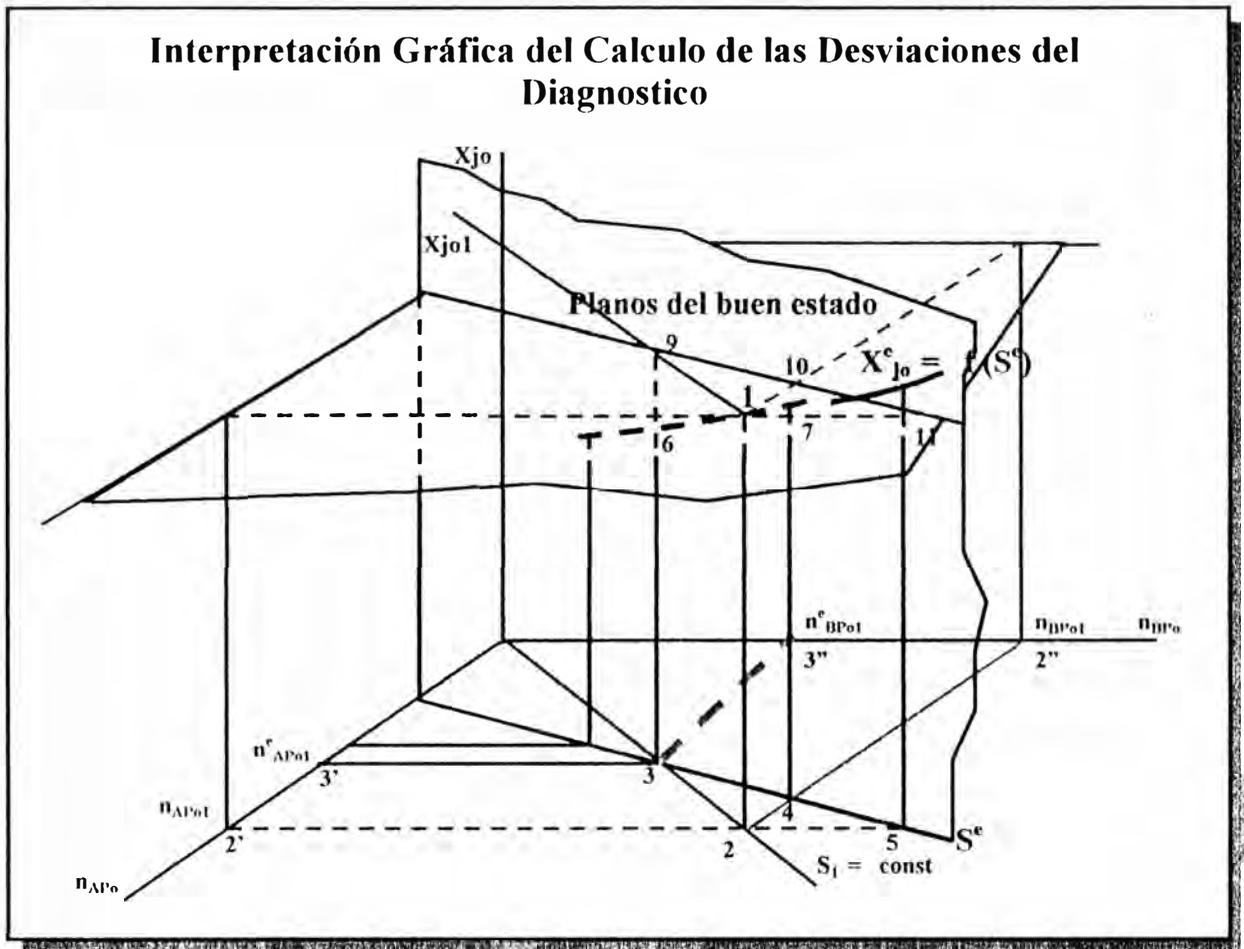


Fig 4

Utilizando las funciones (2.27), (2.28) y (2.29), se determinan los siguientes puntos 4 y 5 (fig 4), es decir, el valor del deslizamiento para los valores S_{bi}^e , S_{ni}^e en la línea escalón de deslizamiento para los valores reales de frecuencias de rotación semejantes n_{APoi} y n_{BPoi} . En otras palabras, estos valores, deberán estar en el motor con buen funcionamiento durante los valores reales de n_{APoi} y n_{BPoi} .

Proyectando el punto 1 (fig.4) en el plano del buen estado paralelo a la línea de deslizamientos iguales $S_i = \text{Const}$, obtenemos el punto 9 con las coordenadas X_{joi}^e , S_i^e . Proyectando el punto 1 en el plano del buen estado

perpendicular al plano $X_{jo} - n_{BPo}$, obtenemos el punto 10 con las coordenadas X_{joi} , S_{bi}^o , y por último, proyectando el punto

1 en el plano del buen estado perpendicular al plano $X_{joi} - n_{APo}$, obtenemos el punto 11 con las coordenadas X_{joi} y S^o .

En caso general el valor de la no correspondencia de los síntomas de diagnóstico se les llama desviaciones de los síntomas del diagnóstico, obteniendo en la etapa f del diagnóstico y que refleja el estado real del motor con sus valores patrones (Calculado por formas determinadas con modelos matemáticos de un motor de un buen estado).

Se entiende por desviaciones absolutas de los síntomas del diagnóstico a la diferencia algebraica entre los valores patrones y reales de parámetros semejantes del motor en la etapa i del diagnóstico. Así, utilizando la fig 4, se puede determinar las siguientes desviaciones absolutas:

$$\Delta (n_{BPo})_i = n_{BPoi} - n_{BPoi}^e \text{ [ó la Fig. 4 (.) 3'' - (.)2'']}; \quad (2.30)$$

$$\Delta (n_{APo})_i = n_{APoi} - n_{APoi}^e \text{ [ó la Fig. 4 (.) 3' - (.)2']}; \quad (2.31)$$

$$\Delta (X_{jo})_i = X_{joi} - X_{joi}^e \text{ [ó la Fig. 4 (.) 6 - (.)9]}; \quad (2.32)$$

$$\Delta (X_{jo})_{Bi} = X_{joBi} - X_{joBi}^e \text{ [ó la Fig. 4 (.) 7 - (.)10]}; \quad (2.33)$$

$$\Delta (X_{jo})_{\Lambda i} = X_{jo\Lambda i} - X_{jo\Lambda i}^e \text{ [ó la Fig. 4 (.) 8 - (.)11]}; \quad (2.34)$$

Cabe indicar que, solamente en los puntos 2 y 3 (fig.4) se observa la igualdad de los criterios de semejanza de los regímenes de trabajo del MTF de los ejes, por cuanto en ellos se observa la condición $S_i = \text{Const}$. De esta forma de lo indicado se deduce que solamente las desviaciones b (2.30), (2.31) y (2.32) están determinados en el régimen gasodinámico semejante y pueden servir para la evaluación de la desviación verdadera con respecto a los valores patrones.

En los puntos 2 y 4, 2 y 5 la semejanza de los regímenes se observa parcialmente por cuanto de ellos solamente $n_{BP_0} = \text{Const}$. Por esta razón las desviaciones (2.33) y (2.34) no pueden servir para la evaluación de los valores reales de la desviación con respecto a sus valores patrones, pero juegan un rol extraordinario para el aumento de la sensibilidad del modelo de diagnóstico, ya que poseen propiedades de aparecer antes que los demás durante el desarrollo de fallas determinadas.

Por desviaciones relativos de los síntomas de diagnóstico entenderemos la relación de la desviación absoluta con respecto al valor del parámetro semejante, calculado por el modelo matemático de un buen estado para el valor del desplazamiento en el régimen estandar para el diagnóstico S .

Por ejemplo, para (2.32):

$$g(X_{j0})_i = S_{ji} = \frac{\Delta(X_{j0})}{X_{j0}^e S^e}$$

(2,35)

Para otras desviaciones absolutas, la estructura de la desviación relativa será análoga a la (2.35). en calidad del valor S se elige la posibilidad matemática esperada del deslizamiento de ejes en regímenes estabilizados del motor, dados por $n_{AP} = \text{Const}$ régimen crucero de vuelo del avión.

Por desviaciones normales de los síntomas del diagnóstico entenderemos la relación de la desviación relativa con respecto a un coeficiente normado. Por ejemplo, para el (2.35) la desviación normada tendrá la siguiente forma:

$$D(X_{jo})_i = D_{ji} - \frac{S_{ji}}{O(S_{j\lambda})_{20}}$$

(2.36)

donde $o(S_{j\lambda})_{20}$ es el coeficiente normado (2.40), igual a la desviación cuadrática media de la desviación relativa S_{ji} , determinado por el modelo inicial de diagnóstico un motor específico.

Por desviación centrada de los síntomas del diagnóstico o simplemente desviación del diagnóstico, el cual más adelante se utilizará para la evaluación de la condición técnica del motor, entenderemos como desviación normada (2.36) cual se ha sustraído el valor de la probabilidad matemática esperada de esta desviación, determinada por el modelo inicial del diagnóstico de un motor específico, es decir:

$$N(X_{jo})_i = N_{ji} - D_{ji} - D_{j20}$$

(2.37)

donde D_{j20} probabilidad matemática esperada D_{j20} (2.39), calculado por el modelo de diagnóstico inicial.

La utilización oportuna de las desviaciones del diagnóstico de la forma (2.37) la analizaremos más detalladamente. Para esto hay que analizar el plano del buen estado, el cual para simplificar las conclusiones se muestra en forma separada, en la fig 5 la región limitada por S_{\min} y S_{\max} conforma el área de probabilidad de los valores S_1 en vuelo de crucero del avión en el

régimen estabilizado y más prolongado del motor, eligiendo en calidad de área de diagnóstico, con una distribución de la densidad de probabilidad igual a :

$$f(S_{j1}) = \frac{1}{\sigma S \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(S_{j1} - S)^2}{\sigma^2}}$$

(2.38)

donde σ - desviación cuadrática media S_{j1} , S^e probabilidad matemática S_{j1} .

En la virtud de los diferentes errores aleatorios del sistema de registro de los parámetros del motor, el valor de los parámetros semejantes X_{joi} , que caracterizan la condición real del motor, también está distribuidos por la ley de distribución normal con la densidad de posibilidad;

$$f(X_{joi}) = \frac{1}{\sigma X \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(X_{joi} - X_{joi}^e)^2}{\sigma^2}}$$

(2.39)

Donde σ_X desviación cuadrática media X_{joi} en el régimen de diagnóstico, y la X_{joi} probabilidad matemática de esperada X_{joi}^e en el régimen de diagnóstico. En la fig 5 se muestra el caso mas común, cuando el error sistemático del sistema de registro no es igual a cero, o cuando la característica real del buen estado $X_{joi} = j(S^e)$, desplazamiento relativo al modelo matemático del buen estado $X_{joi}^e = j(S^e)$, es decir, cuando X_{joi} no concuerda con X_{joi}^e (X_{joi}, X_{joi}^e).

De lo mostrado se deduce que los valores absoluto (2.30, 2.31, 2.32, 2.33, 2.34,) y las desviaciones relativas, (2.30) de los síntomas del diagnóstico tienen características análogas de distribución (2.39).

DISTRIBUCION DE LOS PARAMETROS SEMEJANTES X_{Joi} Y EL DESPLAZAMIENTO DE LOS EJES DEL MOTOR S_1 EN EL REGIMEN DE DIAGNOSTICO

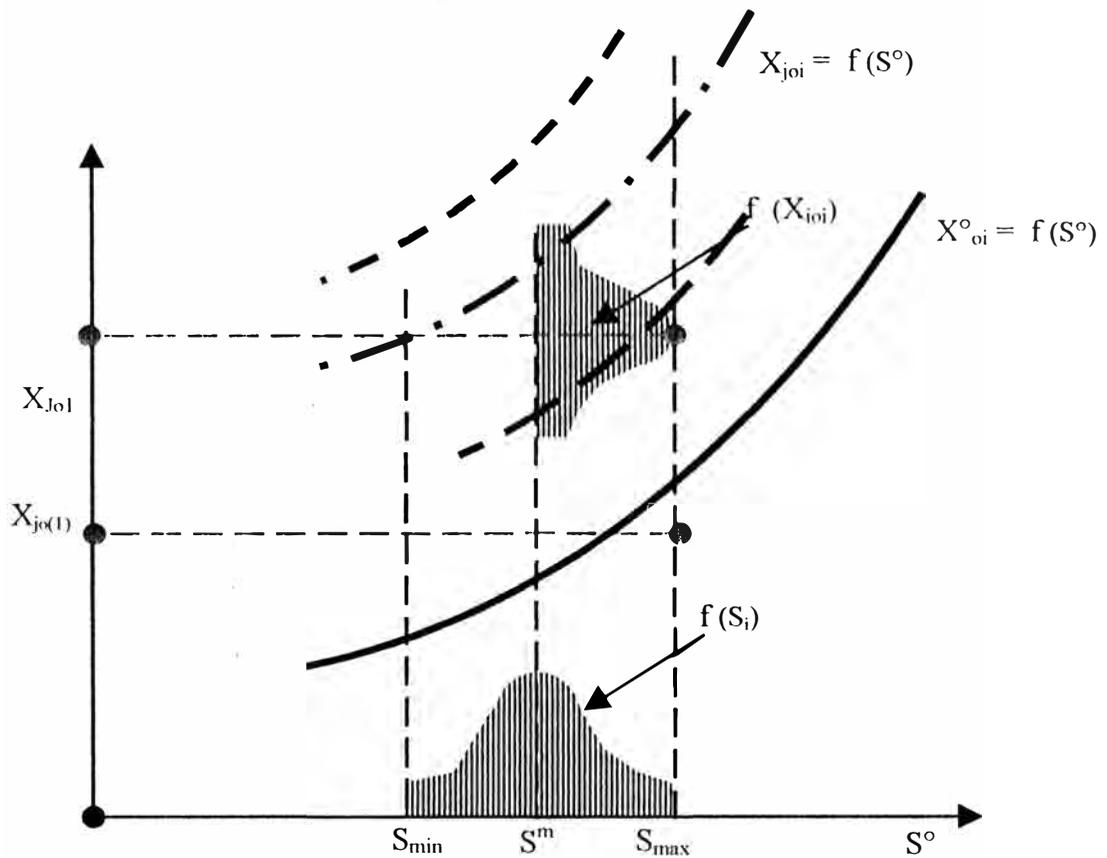
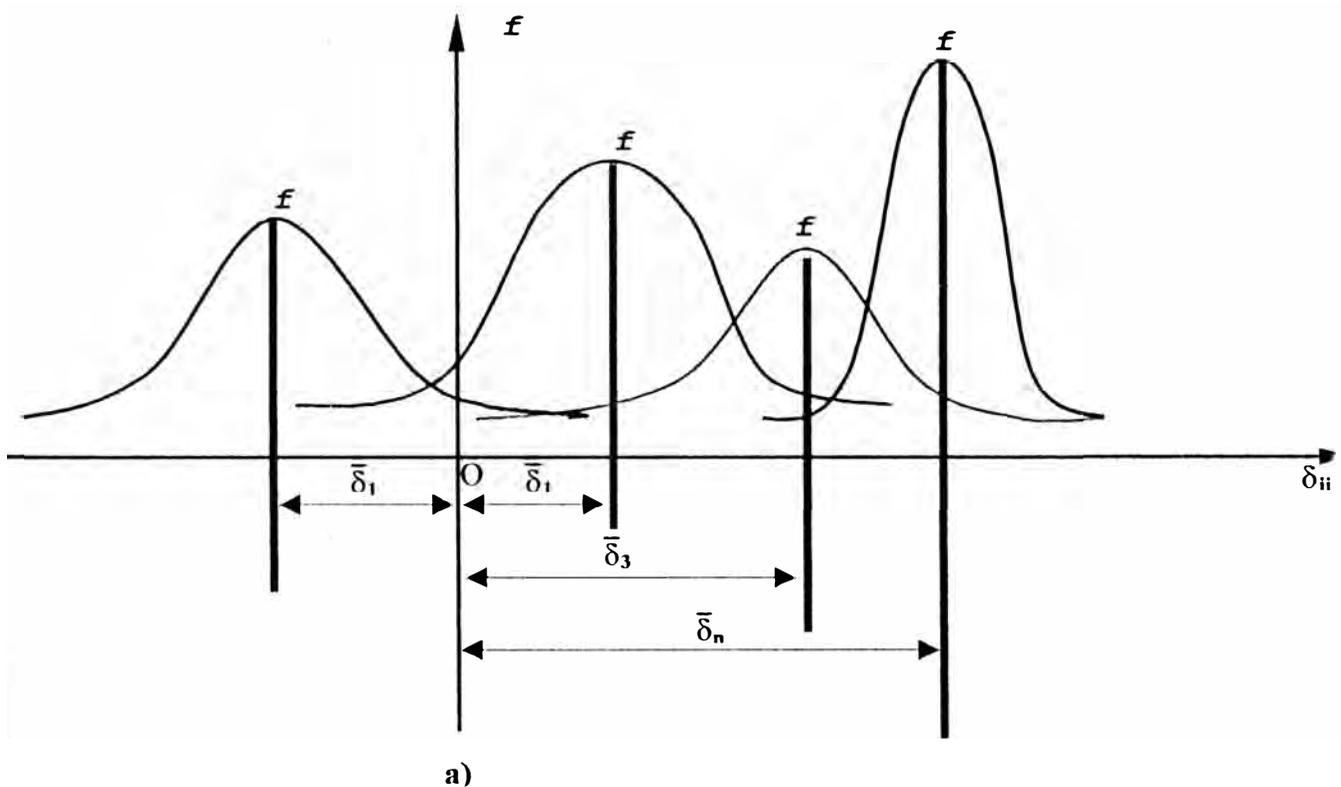


Fig. 5

Por ejemplo, para S_{j1} las características de distribución se representan en la fig. 6a y se caracterizan por las distintas probabilidades matemáticas esperada S_j y desviaciones cuadráticas medias S

A diferencia de los representados en la Fig 6a, las desviaciones de diagnóstico de la forma (2.37), representados en el fig 6b y representan magnitudes aleatorias centralizadas y normadas con la probabilidad matemática esperada igual a cero y $\sigma = 1$, la densidad de la probabilidad de distribución se expresa por la formula:

Características de Distribución de los Valores 11



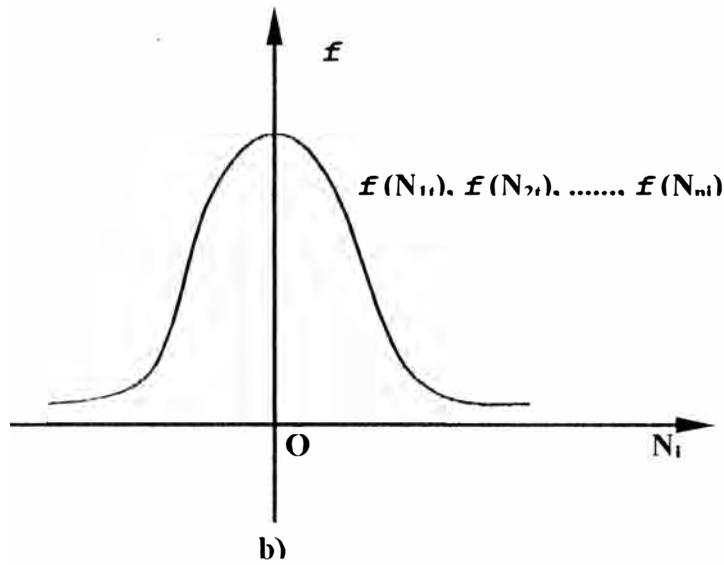


fig.6

$$F(N_{ij}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(N_{ij})^2}{X}}$$

(2.40)

De esta forma, la utilización de las desviaciones para el diagnóstico la forma (2.37) permite comparar las desviaciones de distinta naturaleza física, establecer las tolerancias unificadas para su variación, determinar la valorización del diagnóstico de las desviaciones durante la aparición de defectuosidades en determinado lugar y en determinado tiempo, su desarrollo durante la falla. La utilización de las desviaciones dadas excluye también los errores sistemáticos.

2.2.4.5. El Modelo matemático inicial

Por modelo matemático inicial entenderemos a la descripción estadística de una determinada etapa del diagnóstico de un motor en buen estado o con buen funcionamiento, desde el inicio del diagnóstico hasta la obtención del material estadístico necesario para la descripción de esta etapa. La información suficiente para la formulación del indicado modelo es la obtenida aproximadamente desde los 20 primeros vuelos del avión. Es necesario indicar, que para la formulación de un real modelo matemático inicial, el cual determinará la veracidad del diagnóstico, es la utilización de un motor con buen funcionamiento.

Considerado, que la dispersión de las desviaciones sintomáticas de diagnóstico para un motor con buen funcionamiento está regida por la ley de distribución normal, que refleja las características individuales del número específico de un motor, como componente de la planta propulsora de un avión específico.

- ◆ La probabilidad matemática de esperada de las desviaciones relativas de los síntomas para el diagnóstico es:

$$\delta_{j20} = \frac{1}{20} \sum_{i=1}^{20} D_{ji}$$

donde i – índice de vuelo (o etapa del diagnóstico):

- ◆ La variación cuadrática media de las desviaciones relativas de los síntomas para el diagnóstico es:

$$\alpha (\delta_{ji})_{20} = \sqrt{\frac{1}{20-1} \sum (\delta_{ji} - \delta_{20})^2}$$

(2.41)

- ♦ La probabilidad matemática esperada de las desviaciones normales de los síntomas para el diagnóstico es:

$$D_{j20} = \frac{1}{20} \sum_{i=1}^{20} D_{ji}$$

(2.42)

- ♦ La probabilidad matemática esperada de las desviaciones para el diagnóstico es:

$$N_{j20} = \frac{1}{20} \sum_{i=1}^{20} D_{ji}$$

(2.43)

- ♦ La variación cuadrática media de las desviaciones para el diagnóstico es:

$$\alpha (N_{ji})_{20} = \sqrt{\frac{1}{20-1} \sum_{i=1}^n (N_{ji} - N_{j20})^2}$$

(2.44)

La necesidad de determinar N_{j20} y $\alpha (N_{ji})_{20}$ se origina debido a la limitada elección de 20 vuelos, estos valores en forma insignificante pueden diferenciarse de 0 a 1

Para disminuir la dispersión de las desviaciones para el diagnóstico, originados por los errores aleatorios y además con la finalidad de disminuir los ruidos de alta frecuencia, que interfiere la autenticidad del análisis por la variación de las desviaciones del diagnóstico según su tiempo de operación sin fallas, vamos a realizar la disminución con el dato de 5 vuelos, de esta forma el valor disminuido de desviación se calcula por la fórmula:

$$N_{j20} = \frac{1}{5} \sum_{i=1-4}^i N_{ji}$$

(2.45)

Teniendo en cuenta lo mencionado, las demás características del modelo matemático inicial:

- ♦ La probabilidad matemática esperada de los valores disminuidos de las desviaciones para el diagnóstico en:

$$\bar{N}_{j\epsilon_{20}} = \frac{1}{20} \sum_{i=1}^{20} N_{j\epsilon_i}$$

(2.46)

- ♦ La variación cuadrática de los valores disminuidos de las desviaciones para el diagnóstico es:

$$\alpha (N_{j\epsilon_i})_{20} = \sqrt{\frac{1}{20} \sum_{i=1}^{20} (N_{j\epsilon_i} - N_{j\epsilon})^2}$$

(2.47)

El modelo matemático inicial en el método examinado de diagnóstico sirve también para la determinación de tolerancias individuales en la desviaciones para el diagnóstico según su tiempo de operación sin fallas para un número específico de Motores. En la forma examinada del diagnóstico se utiliza tres tipos de tolerancias:

- ◆ La tolerancia de error en los cálculos de los valores disminuidos de las desviaciones para el diagnóstico, es igual:

$$D_1 = N_{je20} \pm 3 \delta (N_{jci})_{20} \quad (2.48)$$

un incremento aleatorio del cual, en un vuelo es posible con una probabilidad de $q = 0.0027$;

- ◆ Tolerancia profiláctica por variación de los valores disminuidos de las desviaciones de diagnóstico, igual a:

$$D_2 = N_{je20} \pm K \delta (N_{jci})_{20} \quad (2.49)$$

donde k – es el coeficiente para los límites tolerables, con una elección de $n=20$, la posibilidad real límite $\gamma = 0.95$ y la posibilidad de límite continua de una elección general es $P = 0.999$ y el valor $k = 4.319$;

La tolerancia del control por variación de los valores disminuidos de las desviaciones para el diagnóstico, es igual a:

$$D_3 = N_{je20} \pm 3 \delta (N_{ji})_{20} \quad (2.50)$$

Donde $\alpha (N_{jc})_{20}$ se determina por (2.44) para los valores no disminuidos de las desviaciones para el diagnóstico.

Las tolerancias establecidas sirven como fundamento para la toma de solución sobre la variación del estado técnico real con respecto al estado de un motor con buen funcionamiento.

2.2.4.6. Reconocimiento de la condición del motor diferente al buen funcionamiento

En el método propuesto para el diagnóstico del reconocimiento de la condición del motor diferente al del buen funcionamiento, se realiza en base al análisis de la variación de las desviaciones durante el proceso de explotación del motor, es decir por su tiempo de operación sin fallas. Este análisis permite realizar un seguimiento del carácter y la dinámica en el desarrollo de las desviaciones que reflejan la variación de la condición real del motor, asimismo, en función del carácter de su variación determinar las actividades técnicas necesarias para el restablecimiento del buen estado o la capacidad de funcionamiento del buen estado o la capacidad de funcionamiento con un control del desarrollo de las fallas hasta el momento en que se produzcan.

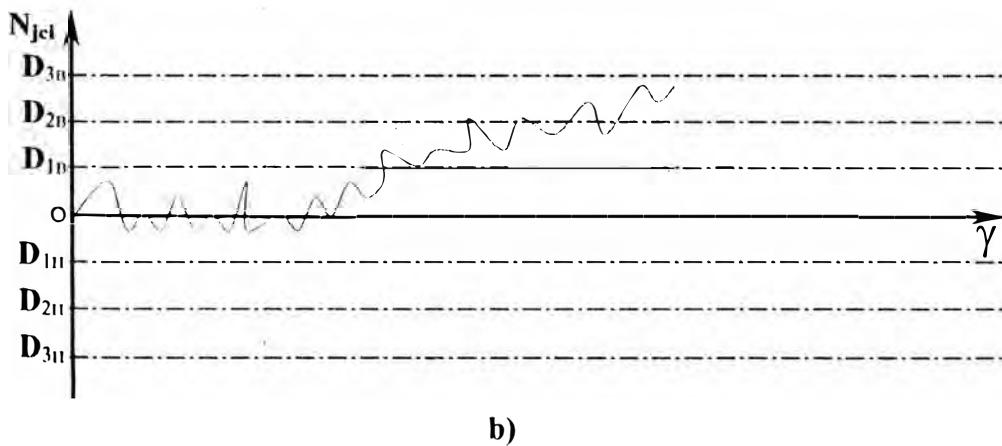
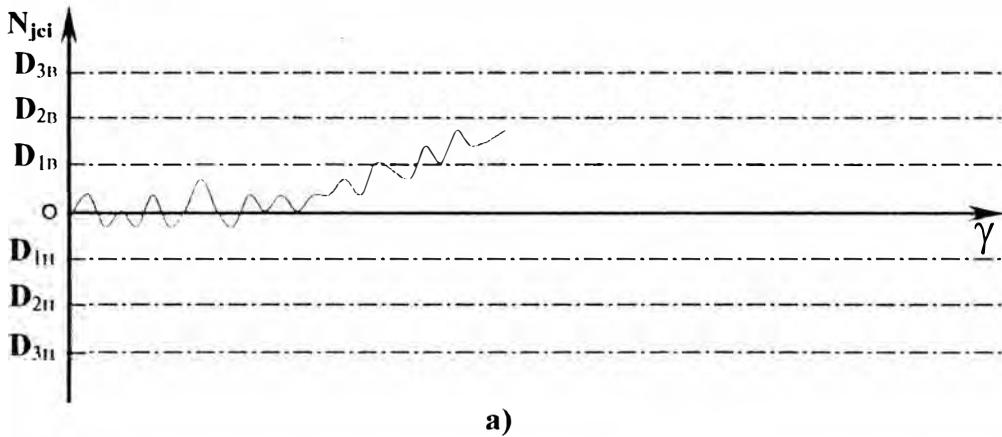
Se debe considerar, que el desarrollo del mal estado y su paso a la falla puede llevar un carácter lento, súbito y trasladable. En reconocimiento gradual de las fallas desarrolladas en forma lenta se realiza el motor, tienen un carácter irreversible y finalmente dentro de un determinado tiempo conlleva a la falla.

Un incremento de la tolerancia D_2 , el motor se clasifica como “FALLA SASPECHOSA” y en la forma más cercana del mantenimiento sea periódico ó operativo, deberá ser considerada, quedando el motor “bajo control” durante su explotación.

- ♦ La salida de las desviaciones del diagnostico tolerancia D_3 en tres vuelos consecutivos (fig. 6c), es decir:

$$|N_{jci}| > D_3 \tag{2.53}$$

VARIACION DE LAS DESVIACIONES PARA EL DIAGNOSTICO DURANTE EL LENTO DESARROLLO DE LAS FALLAS DEL MOTOR



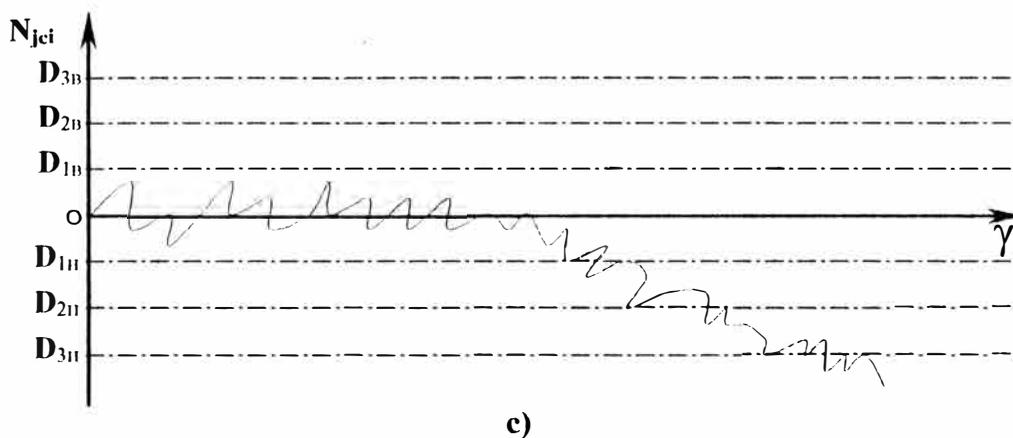


Fig. 6

Testimonia sobre el estado defectuosa del motor. La decisión sobre su posterior explotación se realiza después de una evaluación perital de la condición técnica del motor.

La intensidad de variación de la condición técnica se evalúa por la velocidad en que varían las desviaciones fuera de límite del campo de tolerancia D1, es decir:

$$V(N_{jci}) = |N_{jci} - D_1| / \Delta\gamma_i \quad (2.54)$$

Donde $\Delta\gamma_i = \gamma_i - \gamma_{1i}$ es el intervalo de tiempo desde el momento en que se supera la tolerancia D1 hasta su tiempo de operación sin fallas γ_i . La magnitud $V(N_{jci})$ no debe superar la velocidad límite V_{lim} , es decir la velocidad en que varían las desviaciones desde el límite D1 hasta D3 en el tiempo $\Delta\gamma_m$ entre dos formas cercanas de mantenimiento técnico (periódico y operativo)

$$V_{lim} = |(D_3 - D_1) / \Delta\gamma_m \quad (2.55)$$

Si $V(N_{jci}) \geq V_{lim}$ significa entonces que la posterior operación del motor, inclusive sin superar la tolerancia D_3 , debe ser suspendida y realizar una evaluación perital sobre su condición técnica con la utilización de información de diagnósticos complementarios.

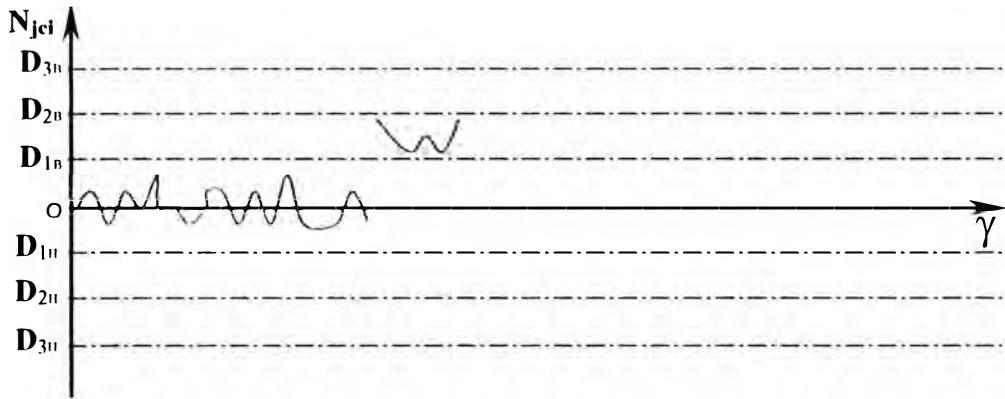
La variación irregular de las desviaciones de diagnóstico (fig.7 a, b, c), independientemente la magnitud del salto (con la condición de que esto no haya sido originado por trabajos realizados en el motor), se clasifica como “defecto súbito”. La variación irregular de las desviaciones se produce, como regla, por un motivo aleatorio, por ejemplo, la caída de un objeto extraño en el motor, la destrucción instantánea de un elemento constructivo, etc., ya que un defecto súbito, por ejemplo, durante la rotura de algunos de los elementos constructivos, puede llevar a un accidente aéreo, entonces la explotación del motor durante una súbita variación de las desviaciones debe ser interrumpida hasta descubrir la causa que la origina.

Cabe indicar, que tales desviaciones irregulares (salto) se identifican con métodos matemáticos estadísticos en base a los datos de cinco vuelos.

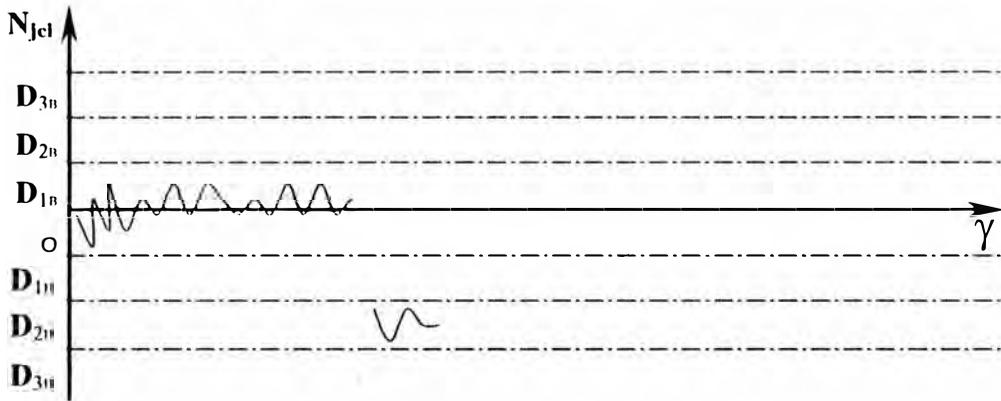
Si $V(N) > V$, entonces la posterior explotación del motor, inclusive sin aumento de la tolerancia D_3 , debe ser interrumpida y se debe realizar una evaluación perital sobre la condición del motor con utilización de información adicional de diagnósticos complementarios.

Si como resultado de la evaluación perital se establece que el motor conserva su capacidad de funcionamiento, entonces la posterior operación del motor para los siguientes 20 vuelos se realiza “Bajo un control Especial”.

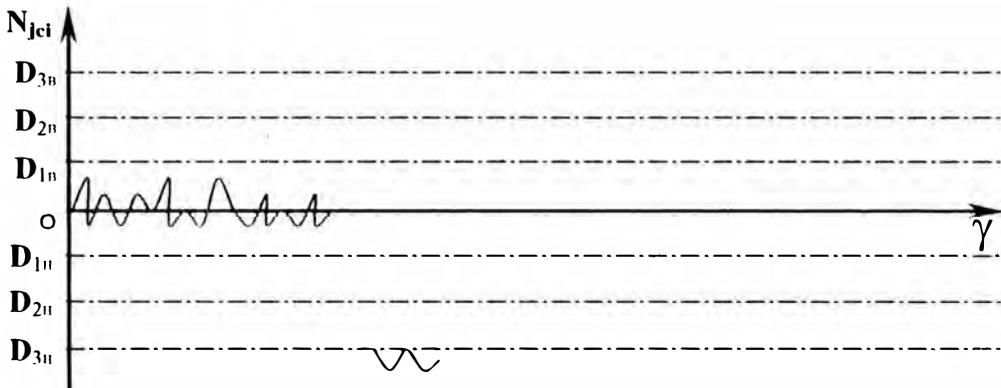
**VARIACION IRREGULAR DE LAS DESVIACIONES DE DIAGNOSTICO
PRODUCIDA POR UNA FALLA SUBITA EN EL MOTOR**



a)



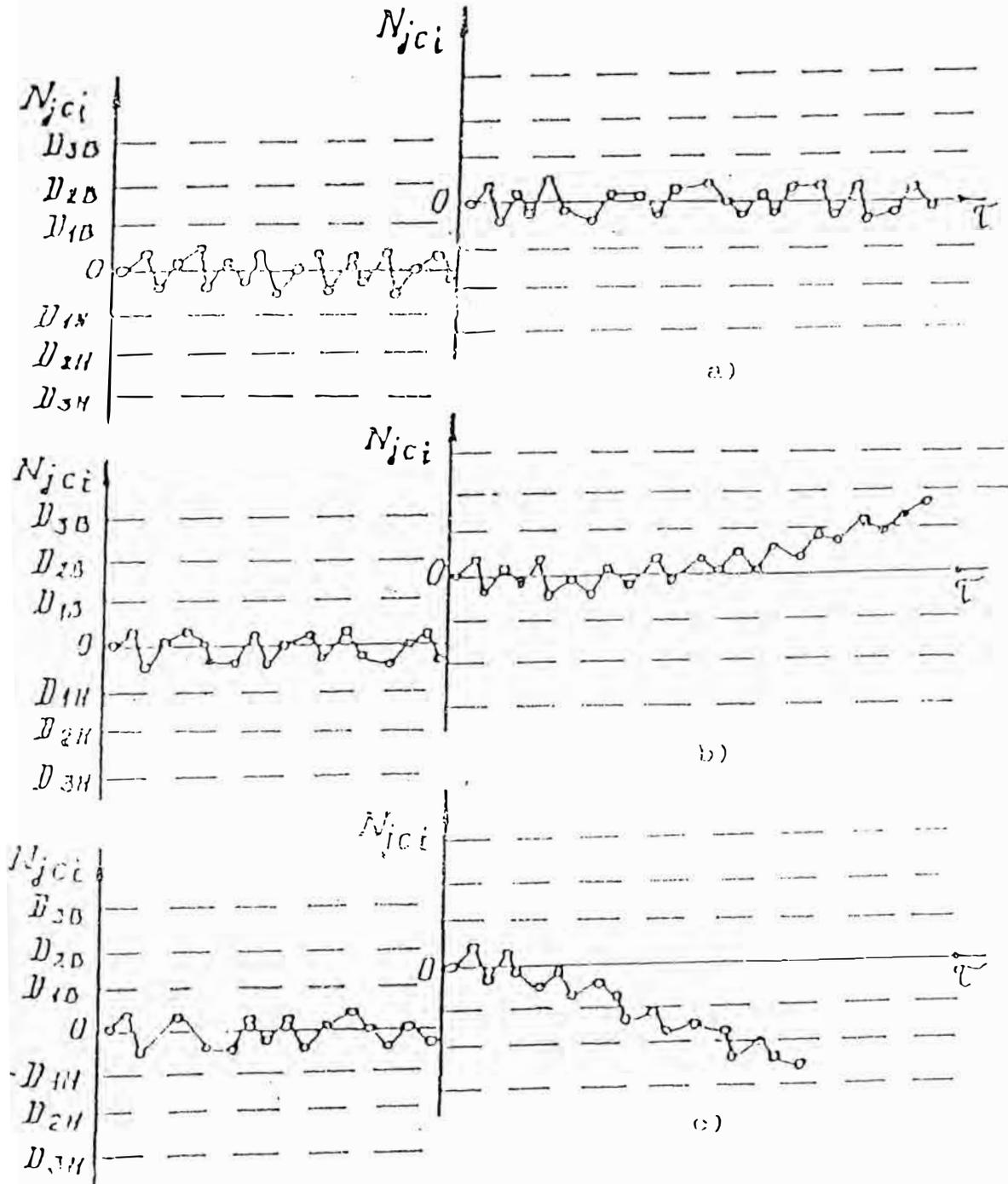
b)



c)

Fig. 7

**ANALISIS DE LA VARIACION DE LA DESVIACION DE DIAGNOSTICO
DESPUES DEL SALTO**



Para esta tolerancia se mezcla en las magnitudes del salto, es decir el valor de la posibilidad matemática esperada por datos de los cinco vuelos después del salto. (fig. 8 a, b, c).

Si el valor de las desviaciones de diagnóstico para los siguientes 20 vuelos después del salto se mantiene en el rango de la tolerancia D_1 , entonces se considera que, la causa aleatoria originada por el salto no varió el buen estado del motor. En este caso se formula un nuevo modelo matemático inicial y el motor continúa su explotación sin límites.

Si (fig. 8.b) el valor de las desviaciones para los siguientes 20 vuelos después del salto supera el valor de la tolerancia D_1 , entonces el motor se clasifica como “Sospecha de falla” es decir, tiene lugar el caso examinado anterior donde se supera la tolerancia D_2 durante el desarrollo gradual de las fallas.

Si (fig. 8.c) el valor de las desviaciones para los siguientes 20 vuelos después del salto supera el valor de la tolerancia D_2 , entonces el motor se clasifica como “defectuoso”, es decir tiene lugar el caso examinado anterior antes en donde se supera la tolerancia D_3 durante el desarrollo gradual de las fallas.

El desplazamiento del mal estado (falla) se caracteriza por el carácter armónico de variación de las discrepancias de diagnóstico durante el tiempo de operación del motor (fig. 9.a,b). La intensificación del estado del motor en forma análoga al caso donde es superada la tolerancia D_1 , D_2 y D_3 durante desarrollo gradual de las fallas.

De esta forma con ayuda del método descrito se puede controlar la condición real del motor, la dinámica de su variación con respecto a su estado inicial y comandar el régimen de operación del motor.

En calidad de confirmación se puede realizar los siguientes datos: las fallas de los elementos y grupos del sistema de control y medición de los parámetros termogasodinámicos del motor se identifican con una probabilidad de un 95%, las fallas súbitas del compresor y la turbina del motor (roturas, desprendimiento, destrucción y otros) con una probabilidad del 85%, además el método propuesto permite controlar la dinámica de variación de las fallas de lento desarrollo en el motor (desarrollo de fisuras, quemaduras, y otros),. Lo que en principio permite variar la estrategia del mantenimiento de los Motores ó sus módulos y accesorios con una periodicidad planificada según su condición real.

VARIACION DE LAS DESVIACIONES DE DIAGNOSTICO DURANTE EL DESARROLLO DEL DESPLAZAMIENTO DE LAS FALLAS

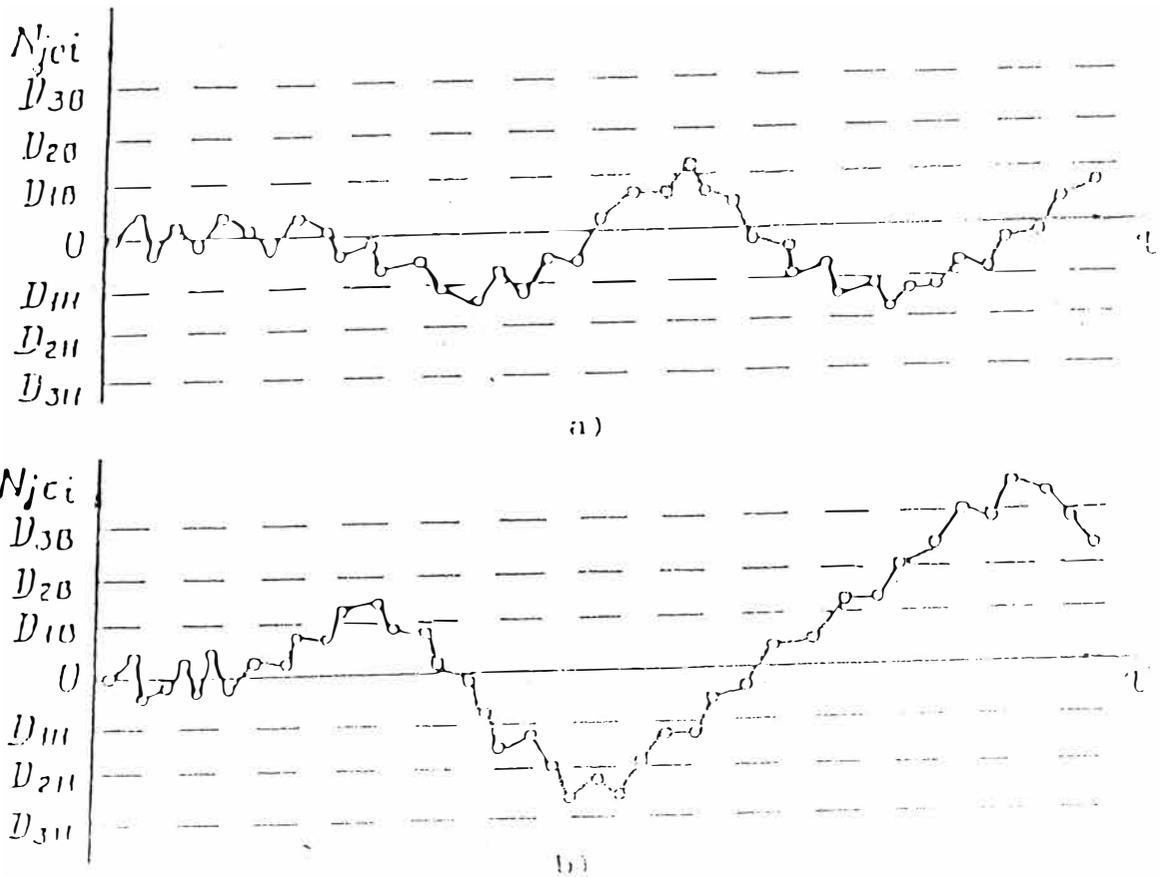


Fig. 9

De esta forma se puede constatar que uno de los más efectivos métodos paramétricos de evaluación del estado técnico de los motores en la explotación, es el método del análisis de variación de los parámetros del motor en el régimen estacionario, con la utilización de modelos de diagnóstico no evidentes.

2.2.4.7. Sistema Complejo Generalizado del Diagnostico de los MTG

De todo lo expuesto anteriormente se deduce que para los MTG, es necesario elaborar una metódica compleja de evaluación y pronóstico de la condición técnica los cuales utilizan distintos métodos y medios en función de lo siguiente:

- ❖ La capacidad de control del motor.
- ❖ Las posibilidades de registro, selección y procesamiento de las informaciones técnicas en vuelo y en tierra.
- ❖ Utilización de los medios de computo y decodificación de las informaciones de vuelo, la cual se acumula en sistemas portadores de a bordo y otros.

El sistema generalizado de diagnóstico se puede presentar en forma de bloques (A1, A2, y A4), cada uno de los cuales se conforma de un número determinado de modelos Fig. 10

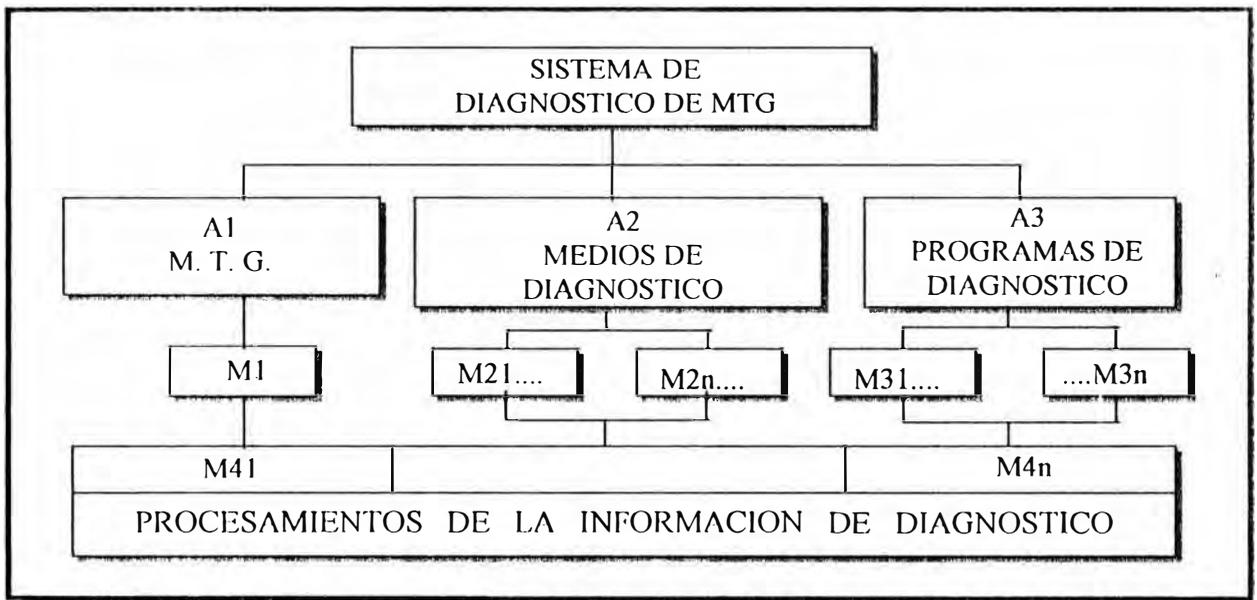


Fig. 10 SISTEMA GENERALIZADO DE DIAGNOSTICO DE LOS MTG

La parte de a bordo (A1) del sistema de diagnóstico, en función del grado de su perfeccionamiento como mínimo debe suministrar el registro, selección, conservación y entrega de la información de vuelo para su siguiente procesamiento en tierra, además puede suministrar la realización de los procedimientos de cálculo para los subsistemas con tiempos de servicio limitados por su resistencia y su fatiga de los elementos de las zonas caliente y fría del motor y otros.

Finalmente el bloque A1 puede desarrollar hasta formar un sistema independiente, llamando sistema automatizado de a bordo de diagnóstico del estado técnico del motor y de los sistemas de las aeronaves, esto se expondrá en el siguiente capítulo de la presente metodología.

El bloque A2 se conforma de un conjunto de métodos de tierra y medios de diagnóstico y control de estado técnico y de sus sistemas funcionales con el correspondiente registro de los resultados obtenidos.

En el bloque A3 con ayuda de los algoritmos elaborados, modelos y medios de programación se realiza una explotación preliminar de los parámetros medidos con el objeto de obtener las condiciones externas invariables y las características de los regímenes del motor, los que se comparan con los patrones.

En el bloque A4 se realiza el reconocimiento de la condición técnica del motor y la localización de las fallas por siguientes medios:

- ❖ La comparación sucesiva de los síntomas de diagnóstico (ó el vector de los indicados síntomas) con los valores patrones (ó el vector de los valores patrones).
- ❖ El análisis de la desviación de los parámetros de diagnóstico con el objeto de pronosticar la condición del motor antes de la falla.

CAPITULO N° 3

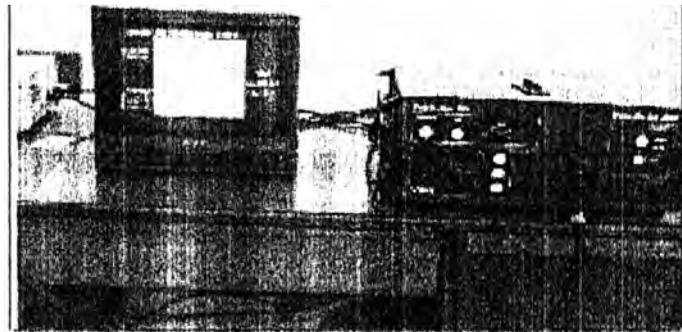
METODOS Y MEDIOS DE CONTROL

NO DESTRUCTIVOS

3. MÉTODOS Y MEDIOS DE CONTROL NO DESTRUCTIVOS

3.1. Métodos visuales y ópticos Permite descubrir quíñaduras, desgaste por erosión, quemaduras, deformaciones, pérdidas del material de revestimiento en los elementos del compresor, turbina, cámara de combustión, tobera reactiva y en otras partes del motor.

Los medios ópticos se conforman de endoscopios rígidos y flexibles, dispositivos televisivos portátiles y estacionarios de registro de imágenes y equipos automatizados para su procesamiento. Junto a los endoscopios comunes se utilizan endoscopios especiales.



3.2 Métodos capilares de control no destructivos: Los métodos capilares de control no destructivos conocidas también como los métodos de control por líquidos penetrantes se basa en la penetración de los defectos y fallas y el registro correspondiente de indicadores de estas fallas

Por la forma de obtención de la información inicial los métodos capilares se dividen en los siguientes:

1. **Método del color o cromático.** Se basa en el registro del contraste del color de ciertos líquidos o gases que sirven como detectores (reveladores) en el fondo de la superficie del objeto a inspeccionar.

2. **Método luminiscente.** Se basa en el registro de parámetros fluorescentes de ciertos líquidos que sirven de detectores cuando se ilumina con rayos ultravioleta.
3. **Método del color - luminiscente.** Se basa en el registro de parámetros en forma de color o por acción iluminación con rayos x de ciertos líquidos que penetra a las cavidades de los defectos.
4. **Método por filtración de partículas.** Se basa en el registro de contrastes brillantes o de colores por la acumulación de ciertas partículas que sirven como detectores en la zona del defecto.
5. **Método del contraste brillante.** Se basa en el registro del contraste brillante de ciertos líquidos o gases que sirven de detectores (reveladores) en el fondo de las superficies del objeto a inspeccionar.

En la reparación de los motores tiene una gran utilización los tres primeros métodos, los cuales se emplean para la determinación de defectos superficiales como: discontinuidades, fisuras, poros, porosidades, pliegues, grietas, capilaridades, etc. que se originan en las superficies de piezas de configuraciones complicadas de materiales no ferromagnéticos de alta resistencia térmica, de aleaciones de aluminio, magnesio y cobre, así como de ciertos materiales plásticos.

3.3 Métodos por radiación no destructivos: Los métodos por radiación no destructivos se basan en el registro y análisis de la penetración de radiaciones ionizadas después de la interacción de los campos físicos con la pieza de control, los métodos por radiación se clasifican en los siguientes métodos: Método de radiación pasada, Método de radiación por difusión, Método por Análisis de activación, Método por radiación caracterizada y Método por Autoemisión. Por la forma de obtención de la primera información se dividen en los siguientes métodos: Método radiométrico (ionización), Método por electrones secundarios, Métodos radiográficos y Métodos radioscópicos.

El método más empleado y difundido es el radiométrico, dependiendo de la radiación ionizada se utilizan los métodos por Rayos-X y rayos-Gamma.

Inspección Radiografía. Una radiografía es un registro fotográfico producido por el paso de los rayos-x y Gamma a través de un objeto sobre una placa. Cuando la placa es expuesta a los rayos-x, un cambio invisible llamado imagen latente se produce en la placa. Luego se sumergen en distintas soluciones, posteriormente se secan, para luego ser manipulados, interpretados y archivados. Se usa para detectar fallas internas, discontinuidades, desgaste por fricción, etc.

3.4 Métodos acústicos no destructivos : A los métodos acústicos se relacionan una serie de métodos que se basan en el registro de las ondas ligeras generales o surgidas en el material de ensayo. Por el carácter de interacción de los campos físicos con el material de ensayo los métodos acústicos se dividen en: Método por radiación pasada, Método por reflexión de la radiación, Método por resonancia, Método por impedancia, Método por oscilaciones libres y el Método por emisión acústica.

El control acústico se utiliza para detectar fallas en el material tales como discontinuidades (rajaduras, poros, fisuras), para el análisis de la estructura (determinar al tamaño de los granos, presencia de partículas extrañas, desuniformidades, etc.), determinación del nivel del líquido en recipientes, medir espesores de los materiales de acceso en una sola dirección, etc.

Uno de los métodos acústicos más utilizados en la aviación es el método por ultrasonido. La radiación y la recepción de las oscilaciones ultrasónicas se realizan a través de un transformador piezoeléctrico con placas de cuarzo, sulfato de litio, titanio etc. Las oscilaciones ultrasónicas generadas por el transformador piezoeléctrico se presentan a través de impulsos cuya oscilación principal corresponde a la oscilación propia de la oscilación propia de las placas.

Para un mejor control las ondas ultrasónicas se dividen en: frontales, laterales y superficiales.

Método por reflexión de la radiación. Conocido por el método del eco, el cual en la actualidad tiene una gran aplicación, al utilizar este método se aplican impulsos ultrasónicos dirigidos. Las ondas ultrasónicas son reflectadas de la superficies (pared) contrarias de la pieza y esta señal es recepcionada por un transformador.

La existencia de fallas en la pieza sujeto a control origina una reflexión de la señal. El intervalo entre el impulso inicial y la recepción de la señal reflectada se mide y se observa en la pantalla del defectoscopio. Sobre las características del defecto se puede juzgar en base a las posiciones y amplitudes de la señal reflectora con el impulso inicial.

Método por resonancia. Se basa en el registro de parámetros de las oscilaciones de resonancia, generados en la pieza de control. El método permite, determinando la frecuencia de resonancia del sistema, medir el espesor de la pieza (por ejemplo el espesor de las paredes de un reservorio). Se utiliza para la inspección de soldaduras, pegamentos, pegamentos mecánicos etc.

Método por impedancia. Es el método más confiable y perspectivo para el control de elementos laminares. Se basa en la utilización en la dependencia de la resistencia mecánica total (impedancia) del elemento de control con respecto a la calidad de la unión de algunos de sus elementos entre sí. La variación de la impedancia inicial del sistema se puede observar, por ejemplo, por variación de la amplitud o fase de la fuerza de reacción (que resulta en los sensores) generados en elementos elásticos de control principalmente por oscilaciones de flexión. El sensor representa una barra que realiza una oscilación longitudinal.

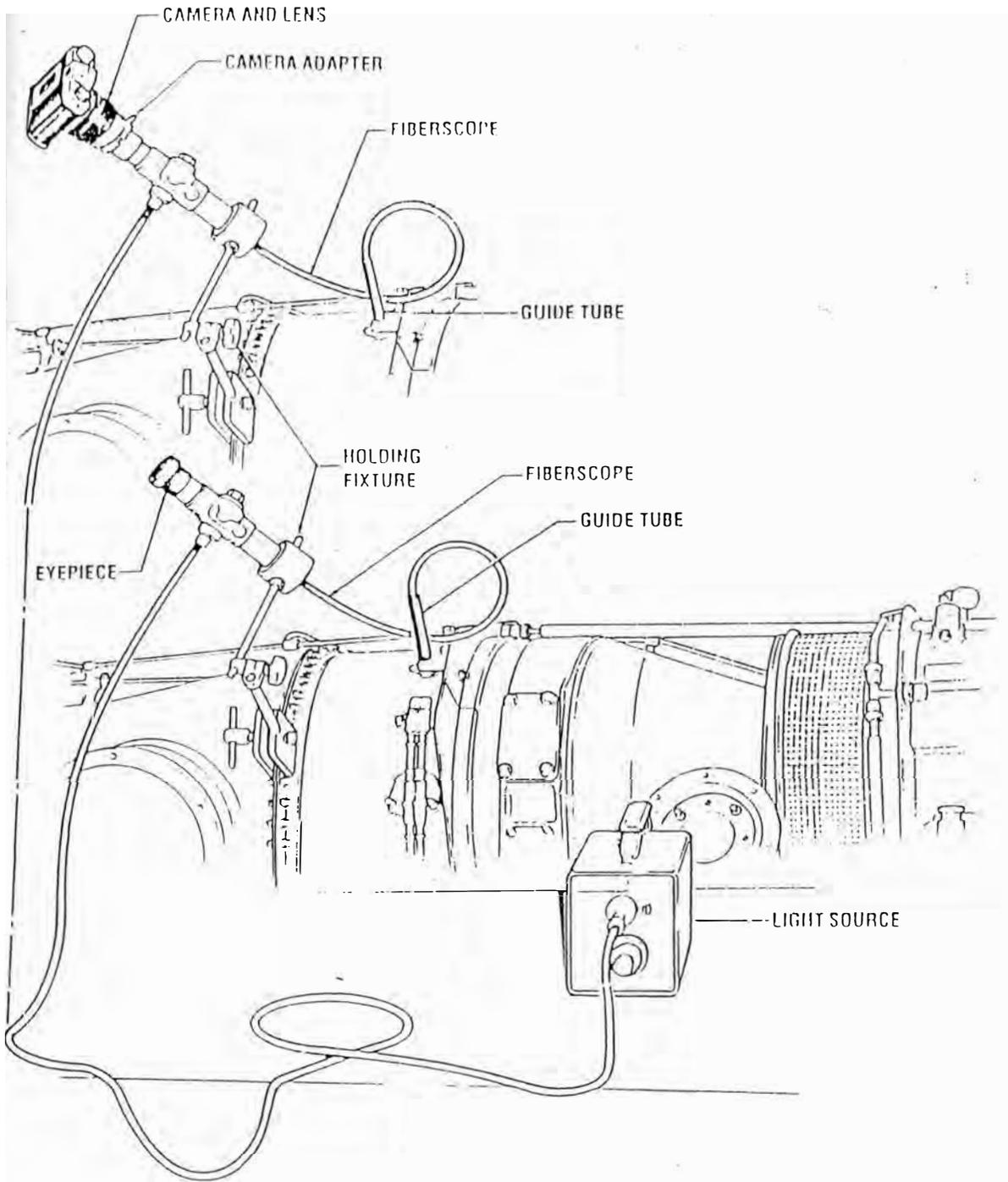
3.5 Métodos Magnéticos de control no destructivos: Estos métodos se basan en el análisis de la interacción del campo magnético con el elemento de control. De acuerdo a la intensidad de la información inicial se clasifican en los siguientes métodos de control magnéticos: Método por partículas magnéticas, Método por resistores magnéticos y el método magnetográfico.

Método por partículas magnéticas:

Se basa en la detección de la difusión de campos magnéticos con ayuda de partículas ferromagnéticas. Este método es muy utilizado en la reparación de la técnica aeronáutica para la detección de defectos en forma de discontinuidades en metales ferrosomagnéticos con defectos superficiales visibles y de aquellos que se encuentran bajo la superficie (hasta 3mm dependiendo del carácter del defecto), con este método muy fácilmente se puede detectar rajaduras templadas, térmicas, rectificadas, y por fatiga.

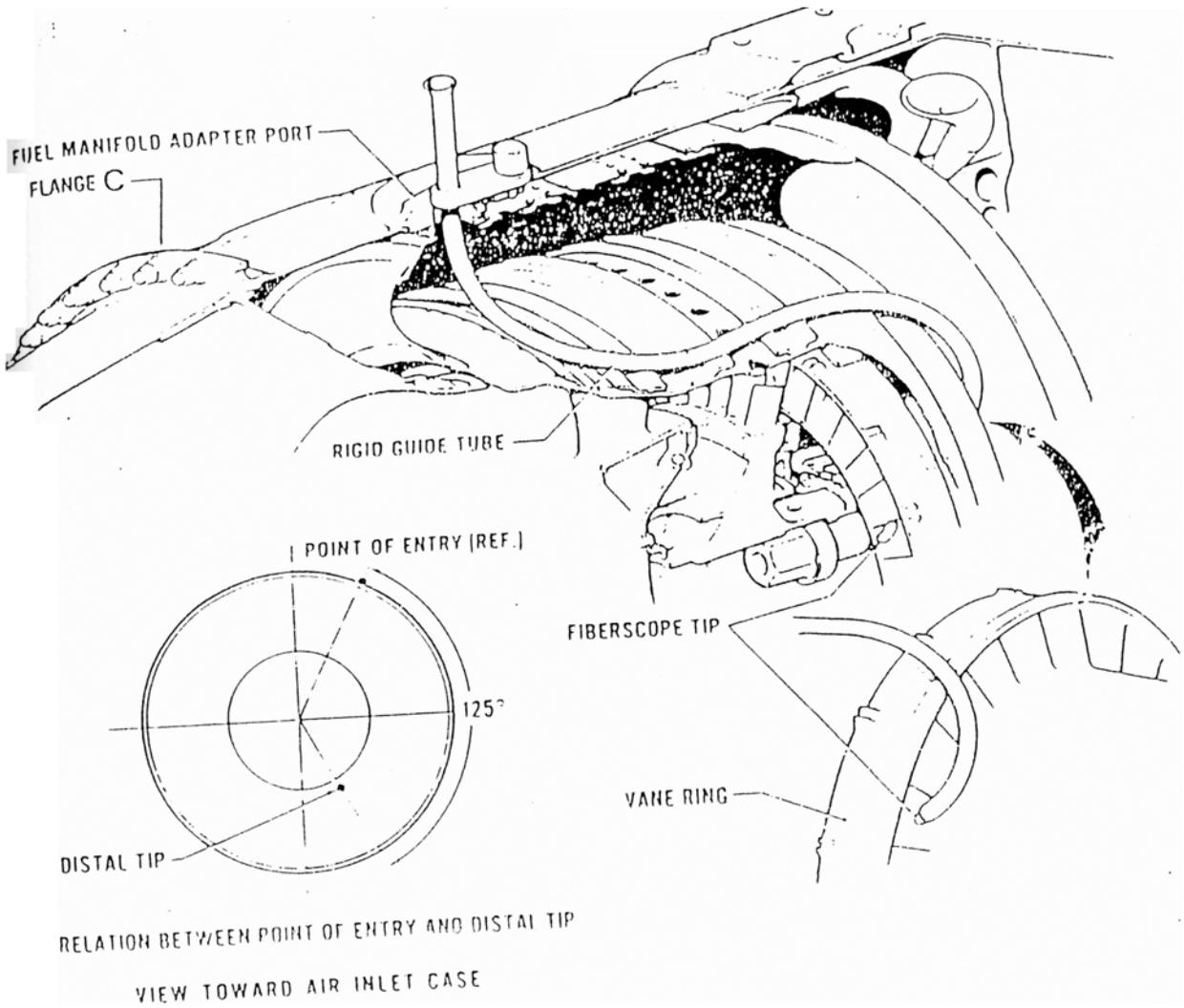
Durante el control se utilizan polvos ferromagnéticos simples o coloreados, así como polvos luminiscentes magnéticos para controlar elementos con superficies oscuras o con superficies brillantes. La aplicación de este método incluye tres etapas: Magnetizar el material, la aplicación de las partículas magnéticas y desmagnetizar. Las partículas magnéticas (medio indicador) se pueden utilizar suspendidos en el aire (secos) o suspendido en líquido, entonces se llama suspensión magnética y se utiliza muy frecuentemente.

3.6 Métodos de Inspección por corriente circundante: un método de inspección electromagnético, se basa en el análisis de la interacción de un campo electromagnético de una corriente circundante de un transformador con el campo electromagnético de la corriente circundante inducida en el material de ensayo. Este método de control permite detectar fisuras en lugares inaccesibles del motor, permite detectar discontinuidades, estructuras heterogéneas, variación de los componentes químicos de materiales Conductores, etc.



21647

Borescope and Accessories Installed (Typical)
Figure 608



Guide Tube Orientation
Figure 610

CAPITULO N° 4

DIAGNOSTICO DE ACUERDO A LOS

PARAMETROS FUNCIONALES DEL

MOTOR

4.- DIAGNOSTICO DE ACUERDO A LOS PARAMETROS FUNCIONALES DEL MOTOR

4.1.- GENERALIDADES

Cada motor tiene su propia nomenclatura de parámetros a controlarse. Se puede afirmar que la cantidad de parámetros registrados de uno u otro motor se reduce a lo siguiente:

| PARAMETROS | INDICACION DE CABINA DE TRIPULACION | REGISTRO PARA EL MANTENIMIENTO |
|--|--|---------------------------------------|
| Posición angular de la palanca de mando del motor. | | |
| Frecuencia de rotación de los motores de alta y baja presión (N1 y N2) | + | + |
| Presión total y temperatura del flujo de frenado en la entrada al motor. | + | + |
| Presión total de aire detrás del ventilador (Fan) | | + |
| Presión total y temperatura de flujo frenado detrás del compresor de alta presión. | + | + |
| Temperatura de flujo frenado del gas en la salida de la turbina de baja presión (EGT). | + | + |
| Temperatura de los alabes. | + | + |
| Temperatura y presión de combustible en la entrada del motor ($T_{Comb.}$, $P_{Comb.}$) | + | + |
| Consumo horario de combustible (F/F) | + | + |
| Temperatura y presión del aceite en la entrada al motor (T_{ac} , P_{ac}). | + | + |
| Presión del aceite en las cavidades del respiradero. | + | + |

| PARAMETROS | INDICACION DE CABINA DE TRIPULACION | REGISTRO PARA EL MANTENIMIENTO |
|---|--|---------------------------------------|
| Cantidad de aceite en el tanque | + | + |
| Vibración del motor en la zona del apoyo del compresor y la turbina (V) | + | + |
| Posición de los estatores del compresor de alta presión y aletas estatoras de aire. | + | + |
| Presencia de partículas metálicas en el aceite por desgaste de partes por fricción | + | + |

En calidad de ejemplo para la evaluación de la condición de la zona caliente por análisis de variación de la temperatura EGT del gas detrás de la turbina en un régimen determinado en la figura 1 muestra la variación de la temperatura con relación al tiempo de servicio del motor, la cual caracteriza la aparición de un defecto, relacionado con la quemadura de los álabes estatores de turbina.

Durante la aparición del defecto, la temperatura aumenta en 2 veces la dispersión de este parámetro, producido por los factores aleatorios.

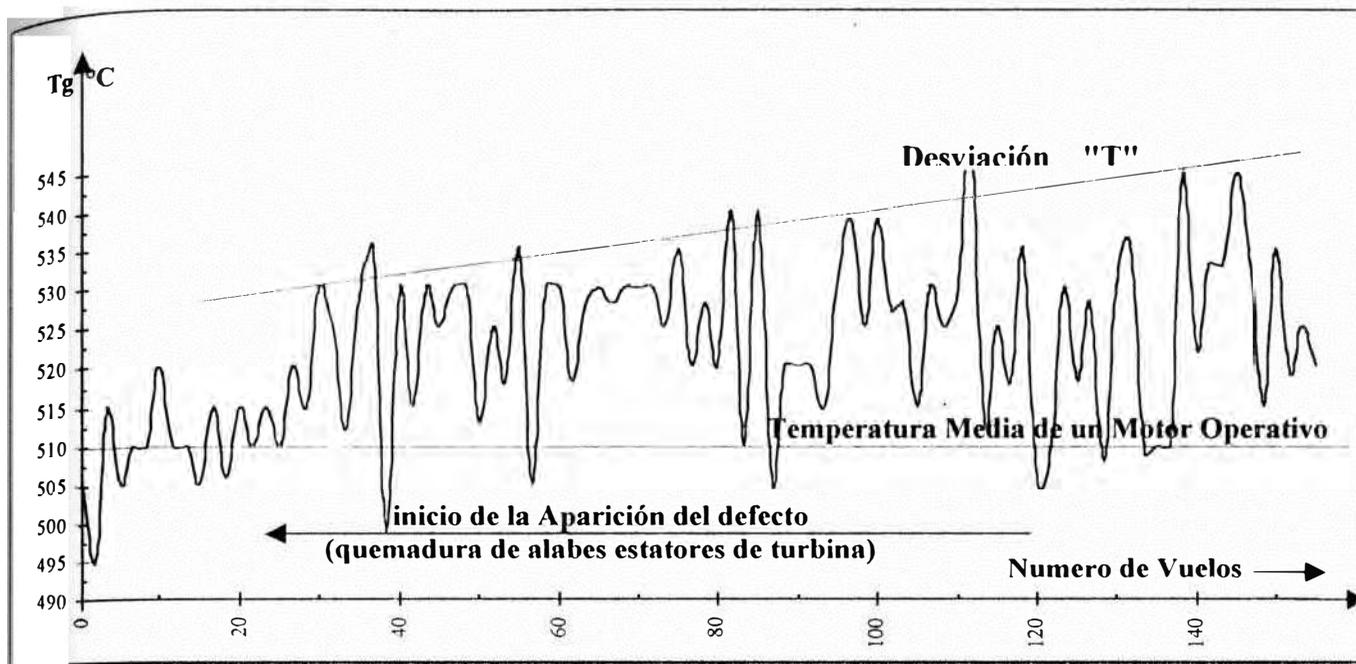


Fig. N°1 VARIACION DE LA TEMPERATURA DEL GAS DETRÁS DE LA TURBINA

La solución de los problemas para procesamiento de la información obtenida por los sensores de los distintos parámetros del motor, y la toma de decisión sobre su condición técnica, se realiza en base a algoritmos especiales de diagnóstico. El grado de perfeccionamiento de los algoritmos determina la profundidad del diagnóstico y depende del volumen y veracidad de la información inicial sobre los valores actuales de los parámetros funcionales del motor, asimismo, y de un adecuado modelo de diagnóstico de procesos reales en el motor.

Se distingue las siguientes etapas principales sobre el tratamiento de los datos:

El diagnóstico de la condición técnica por el conjunto de síntomas. El procedimiento principal utilizado en los algorítmicos de diagnóstico sobre la condición técnica del motor, es la comparación de un vector que representa los síntomas obtenidos para el diagnóstico con los vectores, que caracterizan el buen estado y determinados tipos del mal estado del motor (Vectores patrones).

Para la obtención de una mayor información de los síntomas de diagnóstico en los equipos de procesamiento de datos debe realizarse una transformación lineal del vector inicial de los parámetros controlados.

El algoritmo para el cálculo de la desviación temporal de los síntomas de diagnóstico se basa en la evaluación del criterio estadístico “R” relacionado con el coeficiente de autoregresión “S”, que establece el inicio de las desviaciones características temporales de los síntomas de diagnóstico con respecto a los valores estacionarios iniciales.

Se supone, que la sucesión estadística de los síntomas de diagnóstico se describe por el modelo de autoregresión del primer orden, de la forma.

$$F^* = (R-1) \cdot F^*_{t-1} + E_t \quad \text{donde}$$

$$F^*_t = \frac{F_t - F}{\sigma F}, \quad \text{normal}$$

El valor de los síntomas de diagnóstico (F , σF - valor promedio y valor cuadrático promedio de la sucesión), E_T - sucesión de valores aleatorios, igualmente distribuidos e independientes; $(R - 1) = \sigma$ – Coeficiente de autoregresión (R-Criterio de HOLLID).

Las condiciones en el cual se establece la aparición de las desviaciones no estacionarias en los valores sucesivos de los síntomas de diagnóstico, es $(\sigma) \geq 1$ ó $R \geq 2$.

La sucesión de criterios estacionarios con limitados tramos de realización se basa en el cálculo de coeficientes de autoregresión elegidos y la posterior comparación con los valores admisibles, los cuales se establecen tomando en cuenta la dispersión estadística de los límites teóricos máximos.

La elección del tramo de realización, por el cual conduce la evaluación estadística del valor crítico del parámetro, se condiciona exigencias alternas a la sensibilidad del algoritmo de revelación cuando la desviación se desarrolla poca en el tiempo y a la confiabilidad de su revelación con pocas posibilidades de aparición de errores de diagnóstico.

Los intervalos recomendados para la elección del número de miembros N de la realización temporal de los síntomas de diagnóstico es la condición $15 \leq N \leq 30$.

4.2.- SOLUCION DE LAS TAREAS DEL DIAGNOSTICO, CON LA AYUDA DE MONOGRAMAS COMPUESTOS

Las fallas que surgen en los elementos complicados de los sistemas técnicos de igual número pertenecen a los motores de turbina de gas, resultan diferente influencia en sus características y en los indicios de la condición de estos sistemas.

La finalidad del diagnóstico en los motores de turbina de gas es la localización oportuna de fallas en los elementos con los medios accesibles mínimos.

Una de las principales particularidades del diagnóstico, se refiere a la definición de clases de la condición del objeto según el carácter de desviación de los indicios de bases que muestran las particularidades individuales de los sistemas explotados de valor .

Este ingreso como es correcto se dificulta a causa de los siguientes factores

- ◆ La cantidad de las clases reconocibles de las condiciones n habitualmente supera la cantidad de los indicios M ;

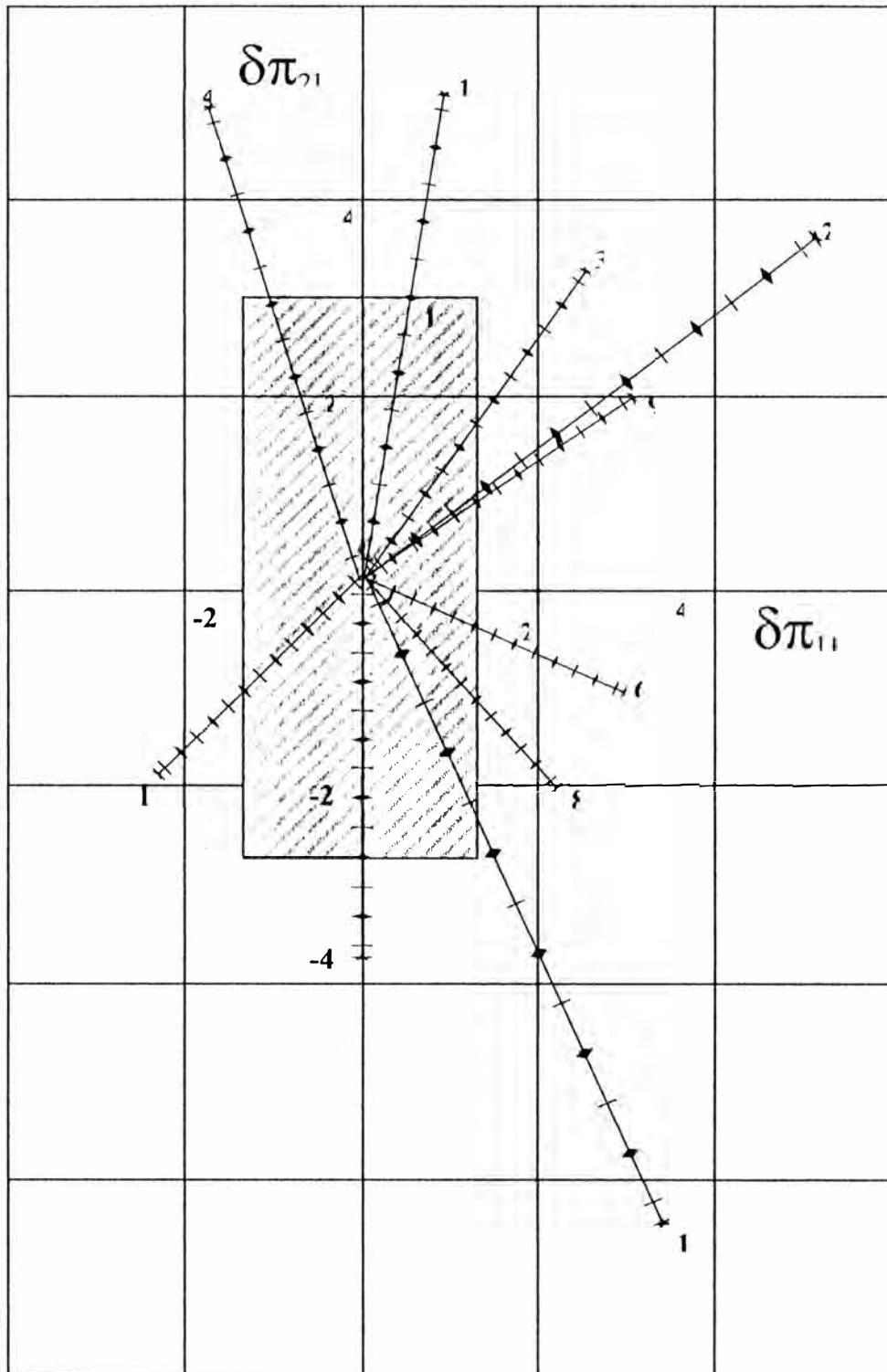
Donde :

$M_o \delta_{a\beta}$ Parámetro de condición ϵ de elemento operativo del sistema.

M Parámetro de condición ϵ de elemento inoperativo

De esta manera se puede recibir los puntos “Críticos”, los que caracterizan la intensidad, los cuales traen las fallas del sistema o de la condición en donde la futura explotación no se deviene oportunamente. Estas dependencias representados en parejas combinadas de la coordenada δM_c en caso general se dispone en forma de “Abanico” relativamente en los puntos cero, los cuales determinan el valor de las señales en la condición del sistema operativo $M_c M\delta_{a\beta}$ recibiendo la imagen de los cuadros inoperativos (Fig N°1) representa monogramas particulares (3,4) los cuales permiten en las mayorías de los casos localizar la cantidad significativa de los elementos inoperativos según las mediciones de las dos indicios de condición.

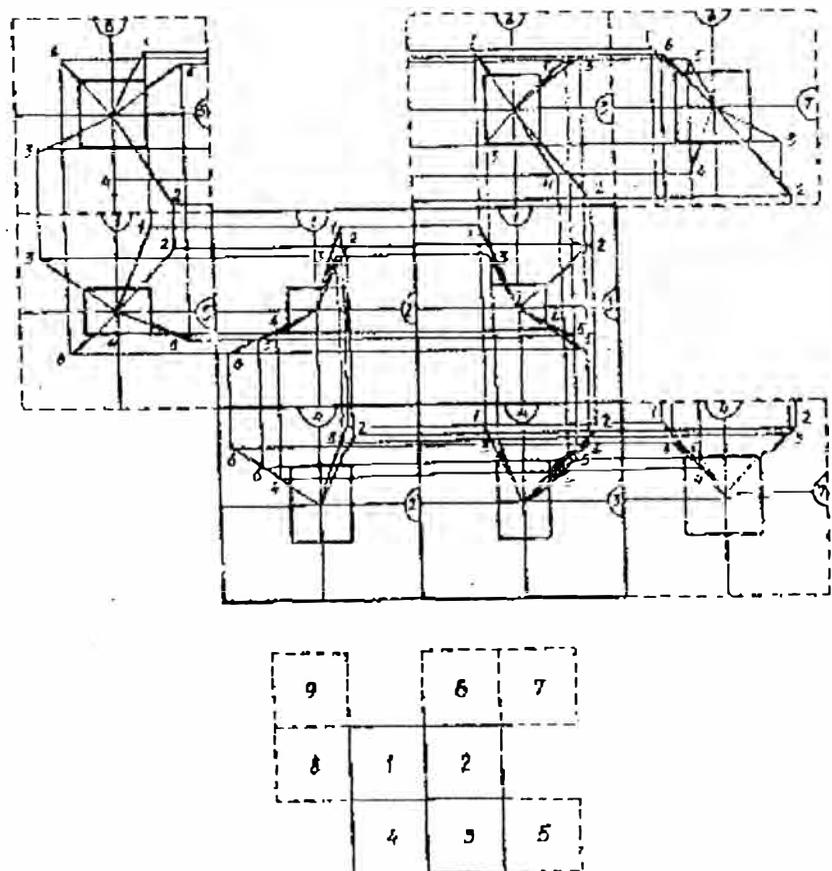
En nuestro ejemplo los obstáculos diferentes son cuatro tipos de inoperatividad (Combinación 1-5 y 2-9)



Monograma Particular

Si es conocida la exactitud de medición de los indicios de condición del sistema de control en los monogramas se puede dividir a la zona insensible (El cuadro marcado en la figura N°1) dentro de la revelación de cualquier tipo inoperativo resulta la inoperatividad de los tipos correspondientes según los indicios de condición sin exceder la exactitud de medición no puede ser localizados del todo (5^{TO} tipo en la Fig.).

La graduación única de la coordenada durante la construcción de los “Cuadros” permite unificar los monogramas separados en componentes de cualquier coordenada de combinación, estableciendo sus conexiones en cualquier dirección y en cualquier plano; conservando los enlaces de proyección como se muestra en la figura N°2.



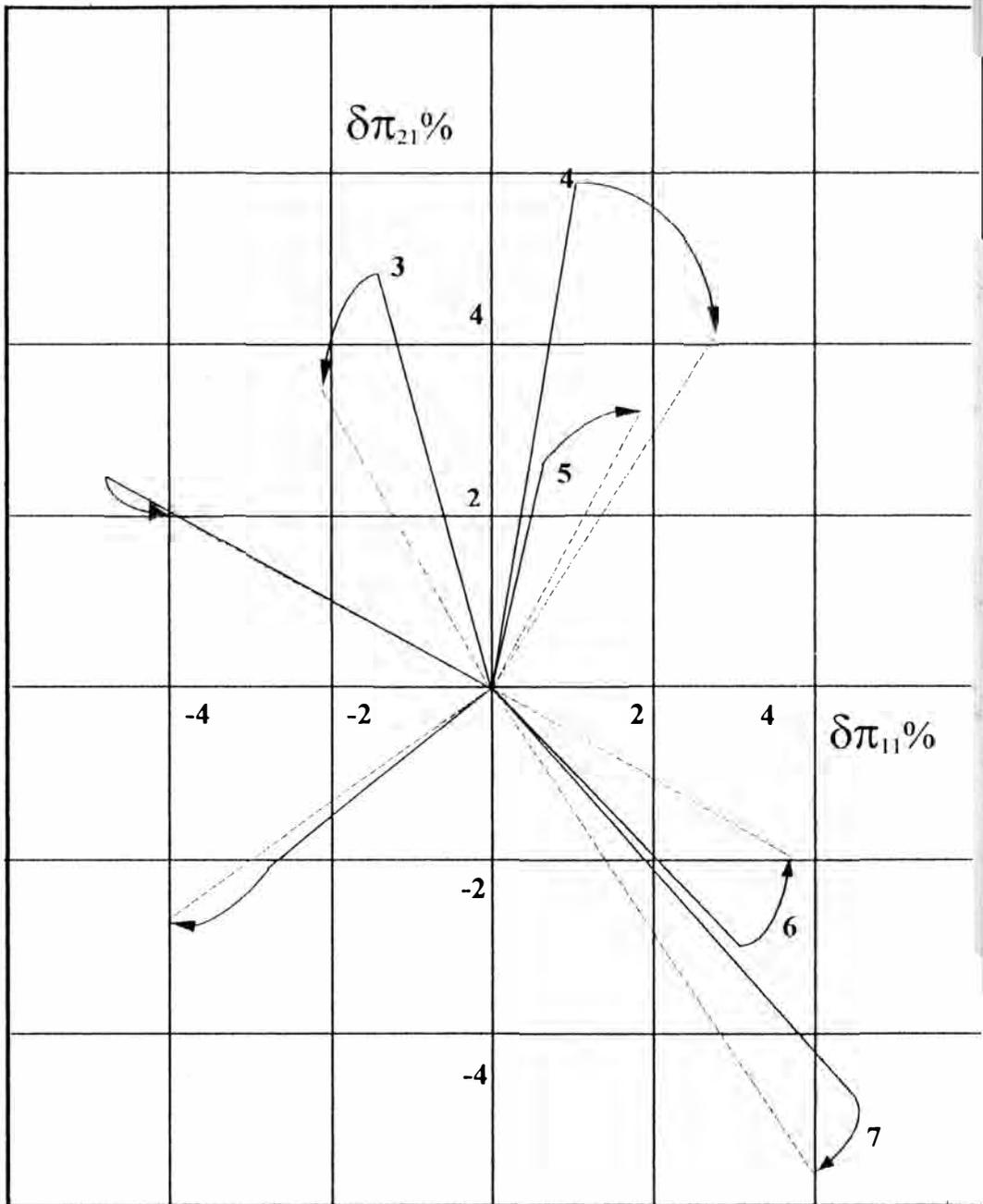
EJEMPLO DE FORMACION DE UN MONOGRAMA CREADO

En este caso resulta posible el cambio de algunos “Cuadros” con otros de una coordenada combinada (En la Fig. N° 2 la dirección positiva de la coordenada esta marcada con los índices de los indicios de condición unidos con semiarcos en el ejemplo puesto los monogramas particulares 1 y 4 representan dos uniones de obstáculos diferentes inoperativos 1-2-3 y 4-5-6.

Según los cambios de indicios de la condición δM_1 , δM_2 , δM_3 y δM_4 , los monogramas con las combinaciones los cuales en la Fig. N°2 rodea con líneas marcadas, se pueden localizar solamente con el elemento inoperativo N°2.

En este caso el sistema de control, incluyendo la medición de los 4 indicios de condición mostrados, no resulta efectivos. Según las combinaciones de los “Cuadros” en los monogramas 2 y 5, se puede reconocer los primeros tres tipos de fallas según los indicios de condición M_1 , M_3 , M_4 y M_7 . En este caso el sistema de control es además poco efectiva. El análisis mostrado de los nomogramas creados muestran que es mas efectiva con el punto de vista de diagnósticos son monogramas 8 (al elevar la exactitud de medición del indicio de condición M_1) y el monograma 9, permitiendo localizar la falla de todos los tipos en dos indicios : M_5 y M_6 Con estos indicios puede ser indicios no medidos que existen con el sistema de control y modelos definidos con la particularidad de una corteza conocida.

En este caso se establece la necesidad de sus mediciones si ellos realmente han sido ejecutados durante la solución de tareas de diagnósticos se puede usar la propiedad de “Cuadros”, cambiar la tendencia de desviación de dependencias (I) como corresponde con los regímenes de trabajos del sistema.



INFLUENCIA DE LOS REGIMENES DE DIAGNOSTICO EN EL CUADRO DE FALLAS

———— REGIMEN N°1 - - - - - REGIMEN N° 2

Como se muestra en la Figura N°3 en una serie de casos se mantienen la proporción de las desviaciones de los indicios de condición (Dirección de dependencias constante) y cambia solamente su cantidad en la mayoría de los casos el cambio de los regímenes llaman a la desviación de dependencia de igual numero en el lado contrario. Esta propiedad en algunos casos puede asegurar el reconocimiento de las clases de condición sin la medición de indicios complementarios.

De esta manera el empleo del diagnostico de los componentes de los monogramas permite resolver las siguientes tareas:

- ◆ Localización de los elementos inoperativos en los sistemas complicados.
- ◆ Valoración de la intensidad de desarrollo de los elementos inoperativos en el proceso de la explotación.
- ◆ Pronósticos de fallas en el sistema según la dinámica de desarrollo de la intensidad.
- ◆ Valoración de la efectividad de los sistemas de control.
- ◆ Fundamento de la necesidad de la exactitud de medición en los indicios de condición.
- ◆ Fundamento de la nomenclatura de medición de los indicios de condición.
- ◆ Elecciones y fundamento de los regímenes de diagnostico.
- ◆ Estudio de los algoritmos automatizados, localización de los elementos inoperativos de los sistemas complicados.

CAPITULO N° 5

DIAGNOSTICO Y ANALISIS DE LOS

PARAMETROS VIBROACUSTICOS

5.- DIAGNOSTICO POR LOS PARAMETROS VIBROACUSTICOS

5.1.- GENERALIDADES

El rol y tarea del diagnóstico por vibración en los MTG.

Los métodos de diagnóstico por vibración se desarrollan durante el diseño (En la fase de la construcción y acabado de las muestras experimentales) y utilizan durante la producción, operación y reparación del motor. Las tareas del diagnóstico por vibración en los MTG se pueden dividir en dos grupos.

El primer grupo de tareas- determina la condición técnica del motor y de sus elementos, asimismo, la detección oportuna de las fallas durante la operación para mantener la exigida confiabilidad y disminuir de esta forma las pérdidas que estos defectos podían ocasionar durante su eliminación.

Estas tareas se resuelven en la etapa de la explotación, en bancos de prueba, durante el acabado y la producción.

El segundo grupo de tareas- la evaluación de la condición técnica del motor y sus elementos con el objeto de prevenir las defectuosidades que produzcan oscilaciones. Estas tareas se solucionan en todas las etapas del diseño, construcción y explotación del motor.

Por condición vibraciones entienden al conjunto de parámetros que caracterizan la vibración de un determinado objeto. La condición vibracional se puede determinar para un punto específico del objeto, en algunas de sus zonas o en su integridad. La condición vibracional se determina para algunos o todo el conjunto de regímenes de trabajos del motor, asimismo, para las diferentes condiciones de operación.

Pertencen al diagnóstico de la condición vibracional del MTG la evaluación y el pronóstico de la carga dinámica de la construcción, la revelación de oscilaciones peligrosas y las causas de ésta, aparición y evaluación de los factores que influyen en las oscilaciones, evaluación y pronóstico de la estabilidad de los elementos constructivos con respecto a las oscilaciones, la identificación de los procesos vibratoriales.

Las investigaciones de la condición vibracional dirigidas a los Motores en la explotación son muy importantes para la revelación de elementos potencialmente confiables que están sujetos a un acabado.

Se entiende por elementos potencialmente no confiables a aquellos elementos de Motores específicos, cuya confiabilidad corresponde a las exigidas durante el cálculo de tensiones en condiciones normales (régimen estacionarios), pero por defectos aleatorios carácter productivo decrece significativamente y como consecuencia pueden producirse fallas durante la explotación. La confiabilidad de estos elementos se mantienen por la introducción de diferentes actividades constructivo-tecnológicas.

5.2.- PROPIEDADES INFORMATIVAS DE LOS PROCESOS VIBRACIONALES EN LOS MTG

La vibración de los Motores, observados durante las investigaciones para el diagnóstico en el amplio intervalo de frecuencias y amplitudes, representan síntomas complejos de combinaciones y multiplicativas complejas, de síntomas de diagnóstico de distintos tipos: débiles, fuertes, ‘Elementales’, excitados por diferentes fuentes de oscilación y que a su vez representan combinaciones aditivas y multiplicativas de componentes de frecuencia de la mayoría de los síntomas ‘Elementales’ están relacionados con la frecuencia rotacional de los rotores y varían en forma significativa inclusive en regímenes estacionarios del motor.

El espectro de la vibración del motor ocupa prácticamente todo la gamma de frecuencias de sonidos y se determina por las frecuencias de la vibración de los conjuntos rotantes, vibración de origen aerodinámico, procesos dinámicos en el interior del motor (conducto aire-gas), la vibración generada por las transmisiones dentadas rodamientos, bombas etc.

5.3.- TIPOS DE VIBRACION

5.3.1. VIBRACION DEL ROTOR

El rotor es la fuente principal de vibración más importante en los MTG. Cuyo movimiento en cualquier dirección se puede describir por la expresión:

$$X(t) = \sum_{i=1/n}^m A_i \cos(i W_p T + \Phi_i); \text{ donde:}$$

A_i - amplitud de i^{ta} armónica; i - orden de la armónica; n , m - número entero positivo; W_p - velocidad angular de rotación del rotor ; Φ_i - fase de inarmónicas.

El mas fuerte componente de esta serie es la 1^{ra} armónica. Las oscilaciones subarmónicas ($i < 1$) raramente alcanza una magnitud significativa, aunque es conocido su exclusión. La intensidad de las altas armónicas disminuyen con el aumento de i .

El carácter de la variación vibracional del rotor durante la variación de la frecuencia de rotación se determina por las propiedades elásticas del sistema del rotor-caja estatora; La caja estatora condiciona la presencia de una serie de frecuencias críticas de rotación.

Las frecuencias críticas de rotación pueden ser menores, mayores o se encuentran dentro del rango de trabajo de frecuencias de rotación.

La amplitud de la vibración depende de desbalance del rotor, de la relación de las frecuencias críticas de rotación con las de trabajo y del grado de los sistemas de amortiguación de las oscilaciones.

Ante un amplio rango de frecuencias de trabajo no es posible alejarse de las frecuencias críticas rotación.

Cada rotor genera una vibración compleja. Las armónicas múltiples frecuentemente alcanzan magnitudes considerables. Durante la relación de frecuencias rotacionales de los rotores, cercano a la unidad, surgen pulsaciones. La vibración de cada rotor y con mayores armónicas múltiples es suficientemente compleja por forma y composición.

5.3.2. VIBRACION DE ORIGEN AERODINAMICO

La fuente principal de esta vibración son alabes Hélice, Compresor y Turbina.

La vibración de la hélice se produce principalmente por dos causas: Las características aerodinámicas no idénticas de las palas de la hélice y la desuniformidad del flujo que contornea la hélice.

Durante el análisis de las causas vibracionales principales de la hélice se determina por un solo parámetro común- la deflexión de los ángulos de ataque de las palas de la hélice en relación al nominal. La diferencia consiste en la variación de esta deflexión durante la variación del ángulo de giro de las palas. Con las características aerodinámicas no idénticas de las palas de la hélice, la deflexión no depende del ángulo de giro, lo que produce la primera armónica de hélice. Con la desuniformidad del flujo, la deflexión de los ángulos de ataque representan funciones del ángulo de giro, lo que produce la aparición de armónicas mayores.

Lo expuesto en un determinado grado se relaciona con los MTG teniendo en cuenta sus particularidades. De esta manera, en cada etapa del compresor y turbina con un número de alabes rotores igual a Z_p , generan vibración, cuya frecuencia es igual a la frecuencia de rotación del conjunto en iZ_p veces mayor ($i = 1, 2, 3, \dots$).

Con determinado ángulo de posición de los álabes la intensidad de la vibración es proporcional al cuadrado de la frecuencia de giro y a la densidad del medio.

El valor del diagnóstico vibracional de origen aerodinámico consiste en la posibilidad de evaluar la calidad de la fabricación y montaje de los conjuntos rotantes y evaluar de las condiciones de trabajo (Grado de su uniformidad del flujo).

5.3.3. VIBRACION POR PROCESOS DE EXITACION EN EL INTERIOR DEL MOTOR CANAL AIRE-GAS

Las causas de este tipo de vibración pueden atribuirse a la pérdida rotacional en el compresor, a la combustión vibratoria, las oscilaciones acústicas de los volúmenes de gas. Esto es un fenómeno insuficientemente estudiado, pero el valor práctico aumenta con la medida en que se incremente la potencia de los MTG.

Durante la pérdida rotacional del compresor en ciertas condiciones surge una o en algunas zonas las pérdidas aerodinámicas de los álabes. La zona de pérdida se desplaza por las etapas en contra de la rotación con velocidad $\omega_{med} < \omega_r$. En relación a un observador en posición fija, estos se desplazan en dirección del giro de la etapa con diferencia de frecuencia $\Omega = \omega_r - \omega_{med}$. La frecuencia vibracional del cuerpo del motor (toda la caja estatora) con una pérdida muy desarrollada $\omega_{caja} = (0.3 \div 0.6) Z \omega_{med}$. El cual demuestra que no tiene un enlace rígido con la frecuencia rotacional del rotor.

En el proceso de combustión y bajo ciertas condiciones puede convertirse en fuente de una fuente de vibración. Una combustión inestable (vibratoria). Surge a consecuencia de la interacción del proceso de la combustión con el sistema de oscilaciones acústicas y representan a su vez un proceso acústico de auto-oscilación. En el volumen de gas, recluido en la cámara de combustión (o en otro dispositivo), se hace posible; las oscilaciones propias longitudinales y transversales (tangenciales y radiales), cuyas frecuencias son directamente proporcionales a la velocidad del sonido y dependen de las longitudes de la cámara de combustión.

El rango común de frecuencias oscilatorias están distribuidos en los límites de 50-5000 HZ; en las cuales las oscilaciones longitudinales representan la mas bajas, y las radiales, las mas altas.

La combustión vibratoria en los MTG frecuentemente aparecen en las cámaras de Combustión y se explica por el surgimiento de un conductor térmico variable a consecuencia de la dependencia de la combustión completa con respecto al coeficiente de exceso de aire y a la velocidad de flujo del aire antes de la zona de combustión. Lo más probable es el surgimiento de una combustión vibratoria con mezclas muy ricas y pobres. La combustión vibratoria es posible y en las cámaras comunes de combustión de los MTG.

Además, oscilaciones acústicas semejantes se hacen posibles y sin combustión, hablamos de una autoexcitación del sistema de oscilación acústica con la cual aparecen turbulencias periódicas.

Los componentes vibratoriales, producidos por la combustión vibratoria, están compuestos por la suma de amplitudes de todos sus componentes, siendo muy inestables.

Síntomas vibro - acústicos de la oscilación de etapas rotoras

Durante el trabajo del motor, la vibración de sus elementos están enlazados a las oscilaciones de las etapas rotoras, en sus álabes y discos por las siguientes razones.

Primero- La transmisión de las oscilaciones de las etapas rotoras al cuerpo del motor (chasis) a través de los rodamientos del rotor. Sin embargo en muchos casos las oscilaciones peligrosas de las etapas rotoras se producen en forma equilibrada, al mismo tiempo que la transmisión de las oscilaciones de las etapas rotoras al chasis del motor a través de los rodamientos del rotor será muy débil.

Segundo- La excitación simultánea de las oscilaciones de etapas rotoras y la vibración del chasis de los accesorios con excitadores cinemáticos o por procesos dinámicos en el conducto gas-aire del motor. Las oscilaciones de las etapas rotoras y del chasis del motor están relacionadas a través de un excitador común de oscilación.

Tercero- La generación del ruido acústico y pulsaciones de presión del medio gas-aire que gira con la etapa rotora y la excitación con estos procesos de vibración de los chasis de los accesorios. Las frecuencias informativas de estos síntomas vibracionales, que excitan las oscilaciones de las etapas rotoras son las siguientes:

La frecuencia observada en los álabes de las etapas rotoras es $f_o = Z_n f_r$, donde Z_n – número de álabes; f_r – frecuencia de rotación del rotor;

$f_o \pm k f_r$ ($k = 1; 2; \dots$) Frecuencias Combinadas,

que caracterizan la modulación frecuencia – amplitud de las oscilaciones en frecuencias del tipo f_o . En el caso de auto oscilación de las etapas rotoras con frecuencia f_{ao} las frecuencias informativas de los síntomas vibratoriales f se determina por la función $f = f_{ao} + k f_r$ donde $k = 1, 2, \dots, 0$ el número de los diámetros en las etapas rotoras.

Propiedades informativas de la variación vibracional durante el proceso operacional sin fallas. Las vibraciones pueden variar durante el proceso de operación, inclusive en presencia de fallas mínimas, a consecuencia de los procesos irreversibles, que suceden en el motor tales como: el aumento de fallas por fatiga en las piezas, que experimentan cargas dinámicas; el desgaste de los pares cinemáticos, el desgaste erosivo por acción de los polvos abrasivos y caída de partículas duras; la vibración de las oscilaciones de amortiguación: corrosión y otros.

El análisis de los procesos irreversibles más importantes, que influyen en la vibración de los MTG (Deterioro por fatiga, el arrastre del material, el desgaste, demuestra que la variación de la intensidad vibracional en caso general deberá representar un proceso aleatorio no estacionario en el cual es posible las siguientes etapas:

- 1.- El ajuste vibracional (primeras horas de trabajo); produce las deformaciones de las partes por acción de las condiciones de trabajo, a consecuencia del cual es posible el surgimiento de variaciones bruscas de valores instantáneos en la intensidad vibracional, asimismo, la variación del valor promedio y la dispersión de estas magnitudes.

2.- Período de la variación normal de la vibracional; el valor medio y la dispersión varían lentamente, la velocidad de esta variación puede ser constante.

3.- Período de la vibración brusca de las oscilaciones con un rápido aumento y desarrollo del mal estado; durante el desarrollo catastrófico del mal estado se incrementa las vibraciones.

En todas las etapas es posible la variación brusca de la vibración en períodos cortos y no necesariamente tienden al aumento, que producen los factores aleatorios actuales.

También es posible en su género el enlace inverso entre las vibraciones y el grado de desarrollo del efecto. El control de la vibración vibracional teniendo en cuenta el tiempo de servicio del motor en la explotación persiguen diferentes objetivos: No permitir el incremento de las cargas vibracionales en los elementos constructivos, descubrir el defecto en su etapa inicial de desarrollo, descubrir la causa del incremento de la vibración.

Para alcanzar los objetivos indicados es necesario separar las variaciones vibracionales regulares de las aleatorias, asimismo las variaciones regulares de las variaciones relacionadas por defectos o el mal funcionamiento y las variaciones producidas por acción o influencia de factores externos y otros factores de explotación.

Para separar las variaciones regulares de vibración de las aleatorias se han elaborado métodos atenuantes de fluctuaciones aleatorias: el método, está basado en los límites tolerables; los métodos utilizan determinados modelos de oscilaciones con coeficientes, que están en función del tiempo; Los métodos se basan en el filtro de Calman.

Sin embargo en los Motores con buen funcionamiento se observa una variación, regular, producidas por la influencia de las condiciones externas y otros factores de explotación, cuyos valores durante el diagnóstico no pueden ser mantenidos invariables durante todo el período de su tiempo de servicio.

Como por ejemplo, la variación de los parámetros vibracionales del rotor, controlados en determinados regímenes estables de vuelo, están relacionados por la influencia de factores de los regímenes de vuelo, cuyos valores no pueden ser mantenidos invariables de vuelo en vuelo. Durante esto la variación de los parámetros vibracionales pueden alcanzar el valor $\gamma = 0,2 \div 0,3$ y más.

Factores de los regímenes de altura influyen en la vibración del motor de la siguiente forma, la variación de la temperatura en la entrada del motor y por el conducto de gas – aire influye en las fuerzas que excitan las vibraciones rotacionales, en las frecuencias de las oscilaciones propias del rotor y otros elementos del motor, en las oscilaciones de amortiguación, en la frecuencia de rotación del rotor en un determinado régimen de trabajo del motor. La variación de las fuerzas excitadoras esta relacionada con la variación de la excentricidad del rotor durante sus deformaciones técnicas, por la variación de la temperatura, además durante las deformaciones térmicas del carter. Con el incremento de la temperatura de los elementos constructivos del motor disminuye la frecuencia propia de sus oscilaciones.

La frecuencia de giro del rotor en el régimen determinado de trabajo del motor depende de la temperatura en la entrada de acuerdo a las leyes de regulación del motor.

La presión en la entrada al motor y por su conducto puede influir en forma directamente proporcional en el desbalance aerodinámico del rotor y en las oscilaciones de amortiguación aerodinámica.

La presión y temperatura del aceite en el rodamiento de amortiguación flexible, generalmente está relacionado con el sistema de lubricación del motor, las cuales influyen en la efectividad de las oscilaciones de amortiguación del rotor: Con el aumento de la presión, la efectividad disminuye y con el incremento de la temperatura la efectividad disminuye a consecuencia de la disminución de la viscosidad del aceite.

Durante el diagnóstico de la condición del motor el registro de la vibración así como de otros parámetros, se realizan en un determinado régimen de vuelo, generalmente en régimen crucero.

Los factores de los regímenes de altura realizan una compleja influencia en la vibración rotacional del motor. Esta influencia, es evaluada por el método de análisis de correlación plural del valor vibracional de los factores de regímenes de altura, registrados durante la realización del vuelo (altura H , temperatura T_h del aire, la frecuencia rotacional del rotor f , la temperatura de los gases detrás de la turbina EGT, temperatura T_{ac} y presión P_{ac} de aceite (el rotor tuvo un apoyo de amortiguación de aceite), se ilustra en la siguiente matriz de correlación de la vibración V del motor y los factores de los regímenes de altura durante el vuelo en régimen de crucero.

| FACTOR | H | T _h | f | EGT | P _{ac} | T _{ac} | V |
|-----------------|---|----------------|------|-------|-----------------|-----------------|-------|
| H | 1 | 0.3 | 0.39 | 0.21 | -0.03 | -0.0 | 0.29 |
| T _h | | 1 | 0.77 | -0.09 | -0.08 | -0.62 | -0.15 |
| f | | | | 0.11 | -0.12 | -0.48 | -0.07 |
| EGT | | | | 1 | 0.40 | 0.23 | 0.44 |
| P _{ac} | | | | | 1 | 0.1 | 0.03 |
| T _{ac} | | | | | | 1 | 0.38 |
| V | | | | | | | 1 |

La vibración de los parámetros amplitudinales de la vibración rotacional durante el mal funcionamiento de los MTG. Puede ser diferentes la variación mas difundida es la desviación del parámetro de vibración fig. Los parámetros de la desviación están relacionados generalmente a las características del desgaste y se determinan por el estado de rodamiento del motor, el desgaste de la parte de la salida y los elementos de fijación de los MTG, el desgaste de los sensores inductivos de vibración, además, la desviación del parámetro de vibración produce no solamente en forma positiva sino también en forma negativa una variación en el desbalance del rotor debido al desarrollo del deterioro de los elementos del rotor, por ejemplo el crecimiento de las fisuras en los discos.

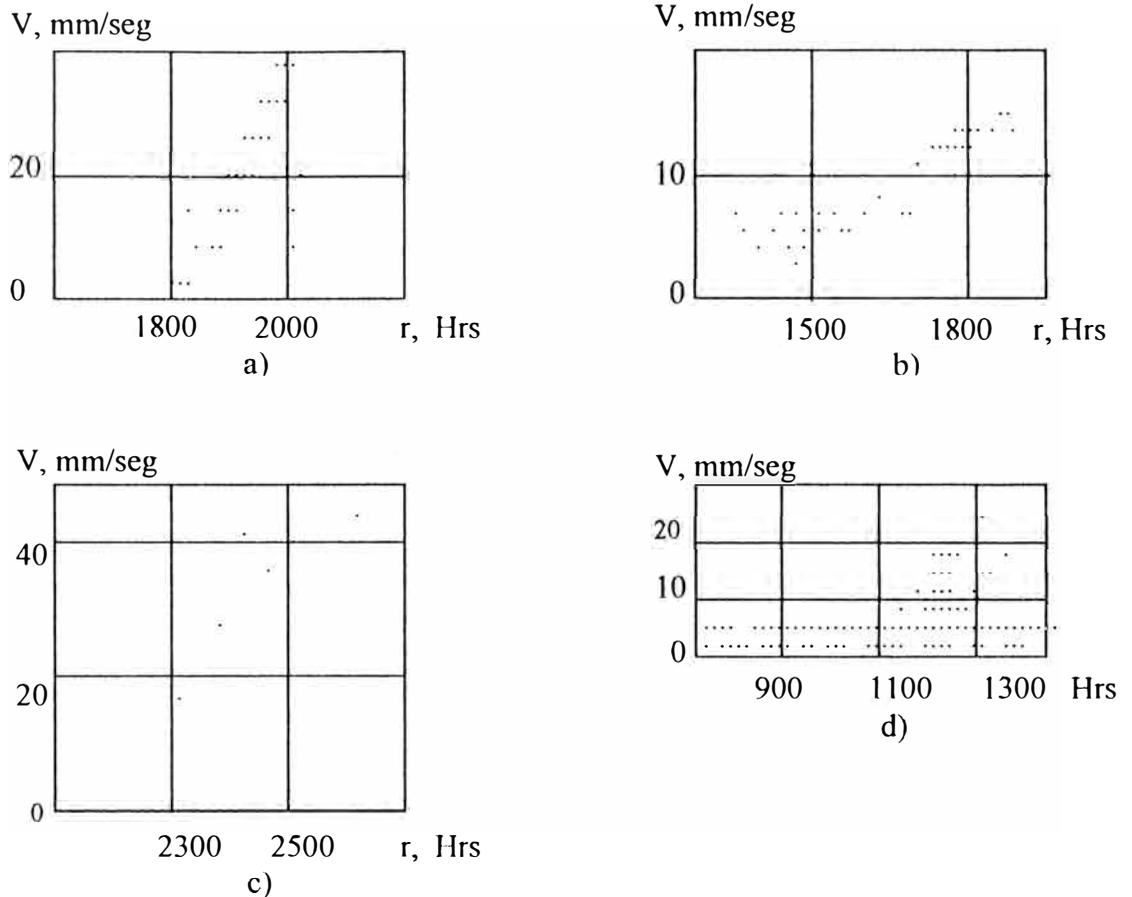


Fig. 4 Variación de los parámetros amplitudinales de vibración rotacional durante las defectuosidades de los MTG:

a- desviación b-salto brusco c-exceso d-dispersión

El segundo tipo que puede estar relacionado con la variación de la condición técnica de los MTG, en el salto del parámetro de vibración (fig). este fenómeno, como regla esta relacionado a la rotura de los elementos del rotor, produciendo la variación instantáneas de la desinformidad del rotor. Este tipo de desbalances produce la rotura de los álabes, la destrucción de los elementos de acoplamiento del rotor, el desplazamiento de las piezas giratorias y otros.

El tercer tipo de variaciones es la variación en exceso del parámetro (fig). Se determina como la violenta variación del nivel de vibración pero con el regreso de su valor inicial. Estas variaciones generalmente están relacionados con las fallas de los equipos de vibración o con la influencia de las raras combinaciones de los regímenes de trabajo del motor y las condiciones del vuelo.

El cuarto tipo de la variación de vibración es la dispersión del parámetro de diagnóstico (fig). La dispersión puede ser originada por la interacción de la vibración aerodinámica y la de origen mecánica.

La desviación, el salto brusco y la dispersión de los parámetros de vibración según su tiempo de servicio es característicos también para los Motores con buen funcionamiento.

Los MTG tienen elevadas velocidades de rotación, ellos vibran luego en una frecuencia dada conocida, un incremento del nivel de vibración es peligroso para el rotor, mediante las señales podemos verificar cuando empieza un mal funcionamiento, el análisis de espectro nos permite precisar en muchos casos que componente es el defectuoso.

Con este análisis se pueden definir cuatro tipos de vibración.

- ◆ Vibración propia debido a que el balance nunca es perfecto, y siempre va a existir, es obvio que no debe pasar los límites aceptables, lo fundamental de este tipo de vibración es que siempre esta acompañado de un número de armónicas (5 ó 6 generalmente).

La frecuencia es fundamental y debe ser igual a la frecuencia de rotación.

- ◆ Vibraciones producidas por los rodamientos, donde la frecuencia es proporcional a la velocidad de rotación.

Si f_r es la frecuencia de rotación del rotor y conociendo:

- d_1 Diámetro interior del rodamiento
- d_2 Diámetro exterior del rodamiento
- d_3 Diámetro de las billas
- N Número de las billas

Un defecto de las billas (ejemplo ovalización) provocará una vibración de frecuencia

$$f_i = \frac{2d_1 \times d_2}{(d_1 + d_2) d_3} \times f_r$$

Un defecto en la pista interna provoca una vibración de frecuencia

$$f_i = \frac{N \times d_2}{d_1 + d_2} \times f_r$$

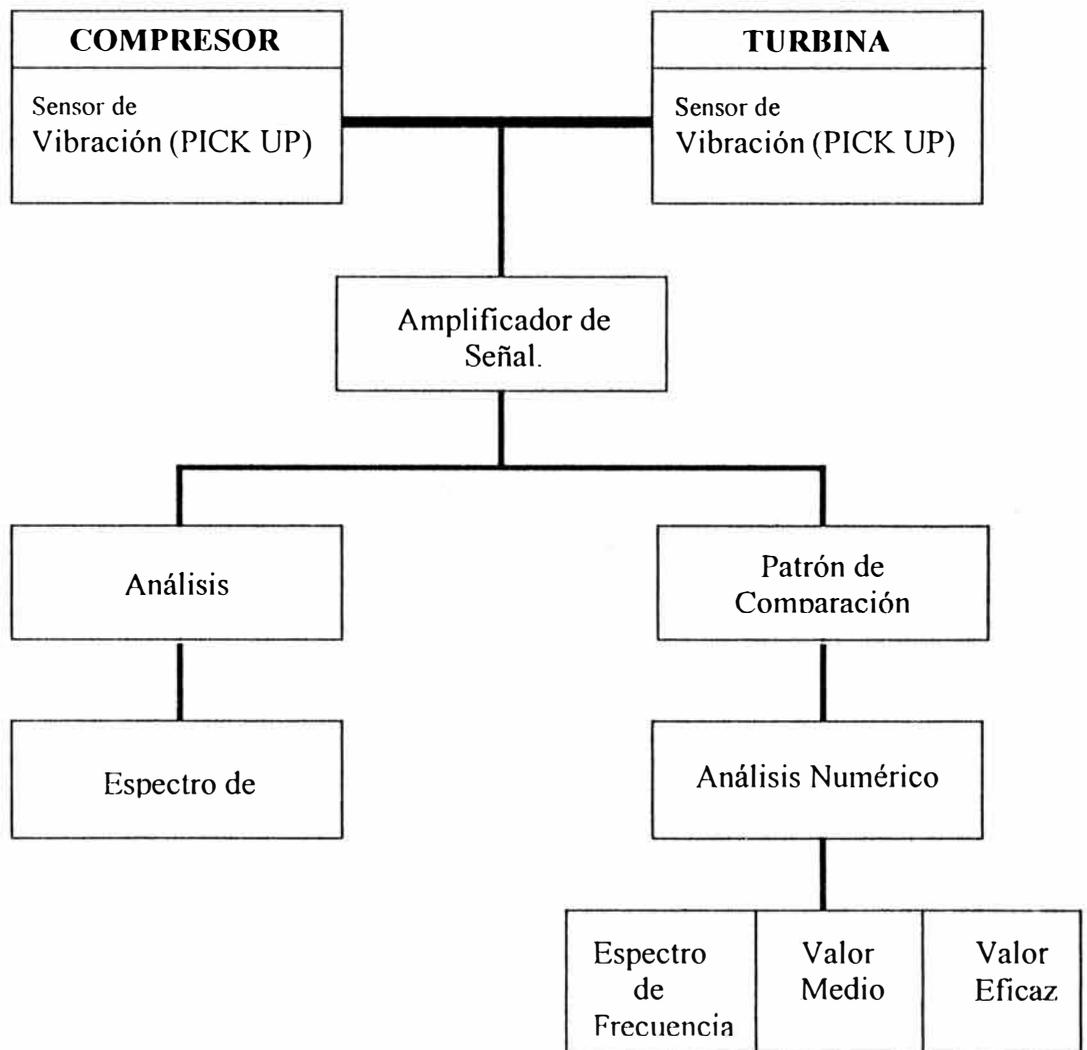
Un efecto de la pista externa provoca una vibración de frecuencia

$$F_e = \frac{N \times d_1}{Sd_1 + d_2} \times f_r$$

Si nosotros conocemos las características de los rodajes, su velocidad de rotación, podremos calcular las frecuencias provocadas por el desgaste de sus diversos componentes, pudiendo localizar el valor correspondiente sobre el espectro, teniendo como referencia un motor nuevo con rodajes en buen estado se puede comparar la altura de las curvas de espectro en un momento importante de la curva particular localizará el desgaste.

- ◆ Vibraciones producidas por los rodajes donde la frecuencia es fija cualquiera que sea la velocidad de rotación. Estas vibraciones son subidas a un deslizamiento entre las billas y las pistas de los rodajes, estos fenómenos son peligrosos para el buen funcionamiento del motor.
- ◆ Vibraciones producidas por el compresor y la turbina, que se sitúan en el dominio de frecuencias elevadas. Si P es el número de álabes de un compresor que rota a la frecuencia f_r , nosotros tendremos un pico del compresor a la frecuencia $f_c = P \times f_r$, análogamente será para la turbina .

Los picos del compresor y la turbina se evidencian fácilmente cuando el análisis se realiza a frecuencias elevadas.



5.4.- EL ALGORITMO DE DIAGNÓSTICO DEL MTG SEGÚN LOS PARÁMETROS VIBRACIONALES SE DIVIDEN EN TRES GRUPOS

El control permisible (de los niveles – preventivo y por límite); las tolerancias pueden ser determinadas o variadas teniendo en cuenta el régimen de trabajo del motor y las condiciones del vuelo de la aeronave;

El control del tiempo de operación con un alto nivel de vibración;

El diagnóstico y pronóstico de la condición técnica del motor por la variación (desviación) de los parámetros de vibración.

El control admisible por máximo nivel de vibración. La tarea principal de esta forma de control es el mantenimiento de la vibro-resistencia y vibro-confiabilidad del motor y de su equipamiento, este control se utiliza y para la detección del mal funcionamiento. El valor límite de los parámetros vibracionales en el Motor Allison 501-D22A es de 50-90 mm/seg

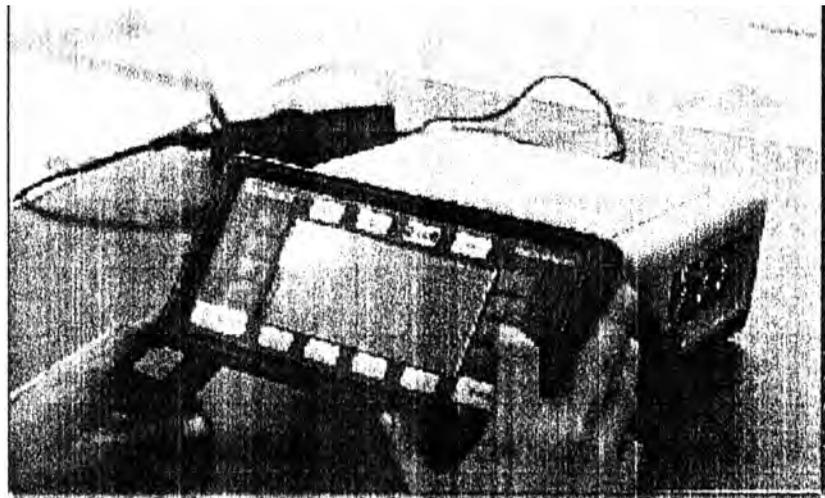
El buen funcionamiento del motor se evalúa por comparación de los valores del mal funcionamiento de los MTG por las tolerancias es un método suficiente aproximado.

Para incrementar su efectividad las tolerancias se regulan escalonada o uniformemente considerando la variación de los regímenes de trabajo del motor y las condiciones del vuelo, (por ejemplo, considerando la altura del vuelo, la frecuencia de giro de los rotores, frecuencias propias de oscilación de los rotores y conjuntos rotantes del motor).

El control del tiempo de operación con un alto nivel de vibración. La tarea principal de este tipo de control es el mantenimiento de la vibro-resistencia y vibro-confiabilidad del motor y de sus equipos en condiciones de sobrevibración mayores a la tolerancia.

El tiempo de operación se controla en las unidades del tiempo o en los ciclos de vibración.

Diagnóstico por la variación de los parámetros vibracionales. La efectividad de detección del mal funcionamiento del motor durante el control de los valores amplitudes de los parámetros vibracionales se incrementan en forma significativa si se analiza su variación a través del tiempo de su operación.



Algoritmos de reducción de la vibración. La efectividad del diagnóstico de la condición del motor aumenta cuando se excluye la influencia de los factores de un buen funcionamiento, es decir la reducción de la vibración a condiciones constantes.

El método de exclusión de influencia de los factores $X (X_1, \dots, X_n)$ en la vibración del motor V_r se basa en la determinación de su dependencia con respecto a estos factores como función $V_r(x)$ de sus valores y la corrección de los valores medios de vibración teniendo en cuenta esta dependencia. La corrección del valor medido de la vibración $V\Phi$ tiene la forma:

$$V = V\Phi - V_r (X)$$

Para encontrar la función $V_r(X)$ se puede utilizar un análisis regresivo multifactor, realizando la aproximación de la función regresiva vibracional por el conjunto de factores x con el método de mínimos (cuadrados. Un ejemplo de la variación del nivel vibracional, es la función $V_r(X)$ para el motor, encontrado por este método, y la reducción vibracional se muestra en la fig. (Correlación múltiple de la vibración y factores de regímenes de altura $r = 0.70$).

La reducción de la vibración en base al análisis multifactorial regresivo utilizable para procesos no estacionarios, la variación es posible mediante la utilización de una elección cuasisestacionarios de datos.

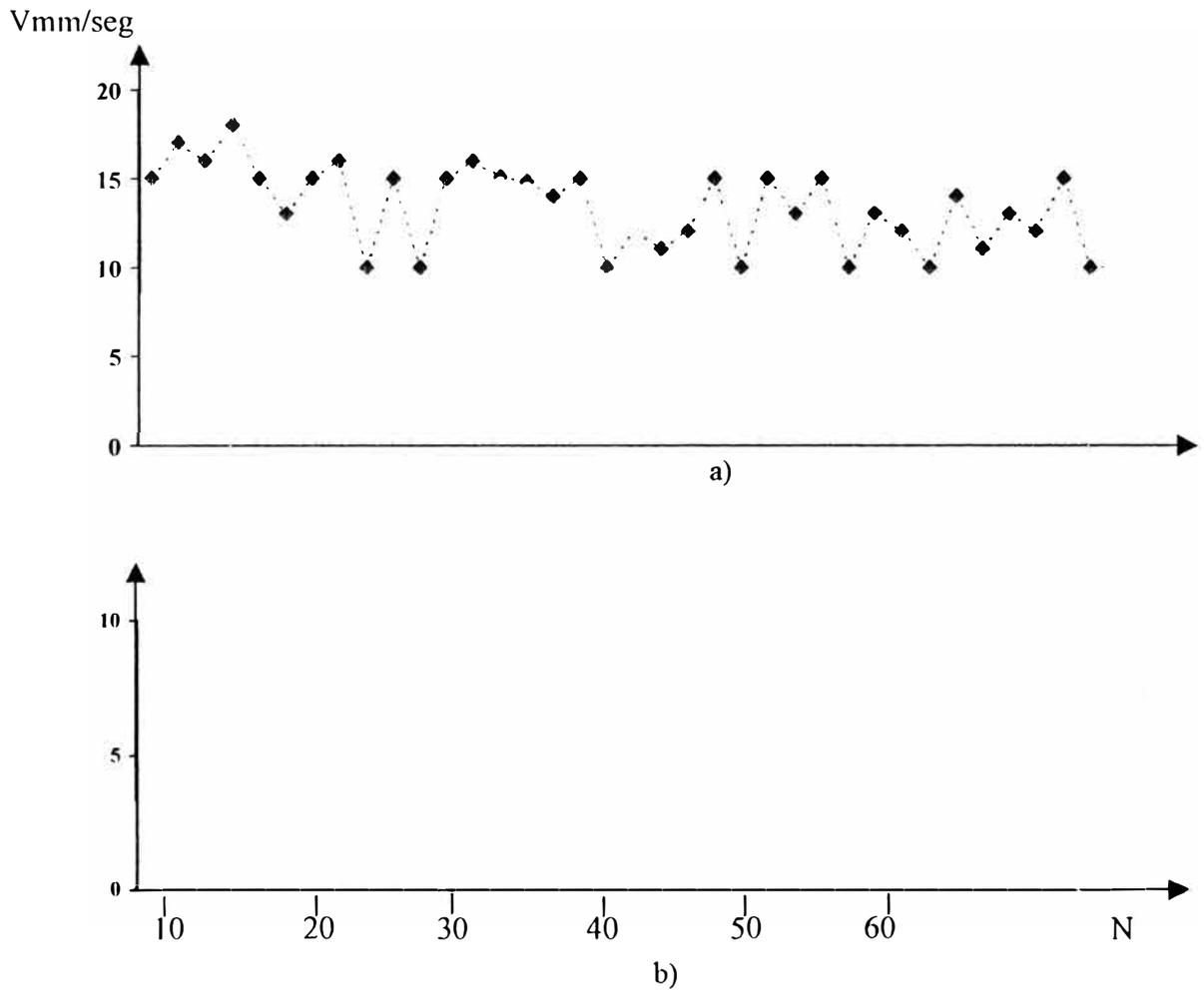


Fig. 5 VARIACION DEL NIVEL DE VIBRACION DURANTE EL PROCESO DE EXPLOTACION DE UN MOTOR EN BUEN ESTADO
a) ● - ● V_r reales; ◆ - ◆ - calculadas V_c ; b) Condicionados

El algoritmo estadístico del diagnóstico de los MTG por variación de los parámetros amplitudinales de la vibración rotacional durante el proceso de explotación. El algoritmo considera las siguientes particularidades informativas de la vibración rotacional de los MTG:

La variación del nivel de vibración rotacional en determinadas condiciones de explotación (la frecuencia de giro, las condiciones atmosféricas u otros). Para los motores en buen estado es decir con buen funcionamiento generalmente representa un proceso aleatorio, en la cual en el período inicial (Período de ajuste funcional) las características estadísticas como el valor promedio y la dispersión varían y luego se estabilizan.

La variación del nivel de vibración rotacional en los límites de una salida en un determinado régimen de trabajo generalmente es menor que en salidas y arranques repetitivos, por tal razón el trabajo en este régimen en los límites de un ciclo se puede representar aproximadamente en forma de un punto temporal, que es una medición del proceso aleatorio de la variación vibracional durante el proceso de explotación.

Durante el desarrollo progresivo de mal estado, el proceso de variación vibracional generalmente se vuelve no estacionario; el volumen de los datos informativos de diagnóstico sobre la vibración aumenta a medida que se adquiere experiencia en la explotación.

Las leyes de la distribución del nivel de vibración aproximadamente se puede considerar normales. Durante el diagnóstico se registran uno de los parámetros del nivel de la vibración rotacional a un determinado régimen de trabajo del motor y determinadas condiciones de vuelo.

La variación de la vibración, que atestigua un posible mal funcionamiento, se establece por comparación de mediciones actuales y las características estadísticas del proceso aleatorio de variación de la vibración de un motor específico y un grupo de motores con buen funcionamiento.

Para cada motor específico se determina el rango de las posibilidades estadísticas de los niveles de vibración. Con una probabilidad real el primero caracteriza el área del Pronóstico de dispersión de los valores del parámetro vibracional relativo a su valor promedio en función de su tiempo de operación (Número de mediciones); la segunda área de los límites permisibles sobre la dispersión de los niveles de vibración de motores en buen estado de un mismo tipo.

Los síntomas que exigen la toma de decisión para el diagnóstico son:

La salida del rango estadísticos permisible del nivel de vibración por medición

La salida del rango de los valores estadísticos posibles por encima del límite admisible por las condiciones de vibro-resistencia y vibro-confiabilidad, o por encima del límite del rango estadístico de los valores admisibles.

La salida del nivel medido de vibración por encima del rango de valores estadísticos posibles, si es que se encuentra en el rango estadísticos de valores admisibles.

En presencia de determinados síntomas (de uno o varios) se recomiendan las siguientes soluciones:

Durante la aparición única de los síntomas se necesita información adicional para lo cual se recomienda proseguir con la explotación del motor bajo observaciones especiales

Durante la aparición repetitiva de síntomas en un determinado número de mediciones – considerar al motor en mal estado.

El rango estadístico del nivel posible de vibración (parámetros V) de un motor determinado para n- mediciones se determina con la utilización de los límites tolerables de la siguiente forma:

- El límite superior $V_n = \bar{V}_n + K_n S_n$
- El límite Inferior $V_n = \bar{V}_n - K_n S_n$

Donde \bar{V}_n – Valor promedio del parámetros ed vibración con n- medición.

$$\left(\bar{V}_n = \frac{(N-1) \bar{V}_{n-1} + V_n}{n} \right)$$

donde V_n - resultado de n- mediciones, S_n – Valor cuadrático promedio del parámetro V con n- medición:

$$S_n \left[\left(\frac{n-2}{n-1} \right) S_{n-1}^2 + (\bar{V}_{n-1})^2 + \frac{v_n^2}{n-1} - \frac{n}{n-1} \bar{v}_n \right]$$

Para la determinación de \bar{V}_n y S_n se dan las formulas, por el cual es cómodo realizar el cálculo para los sistemas de a bordo, ya que no se exige recordar todos los valores del parámetro, solamente es suficiente conservar el valor del parámetro, solamente es suficiente conservar el valor anterior y el número de mediciones); K_n – Coeficientes de tolerancia, que dependa del número de mediciones.

El rango estadístico de los niveles permisibles de vibración se determina de la siguiente forma

$$\text{Limite superior } \bar{V}_n = \bar{V}_n + K_n S_n$$

$$\text{Limite inferior } \bar{V}_n = \bar{V}_n - K_n S_n$$

Donde S_m – valor de la media ponderada del valor cuadrático medio del nivel de vibración de los motores en buen estado:

$$S_m = \left\{ \frac{\sum_{j=i}^m S_{jij}^2 (l_j - 1)}{(\sum_{j=i} l_j) - m} \right\}^{1/2}$$

donde m – número de motores operativos; l_j - número de medición del motor operativo;

S_{ij}^2 – disposición del nivel de vibración de j – motores con l_j mediciones.

Los coeficientes de tolerancia K_n^s y K_n^i se calculan aproximadamente en base a las evaluaciones de intervalos del valor promedio de la vibración de un motor específico y la dispersión del nivel de vibración de un motor, en dependencia del número de mediciones y al valor de las vibraciones por encima del límite V_n^s y V_n^i para una determinada probabilidad real.

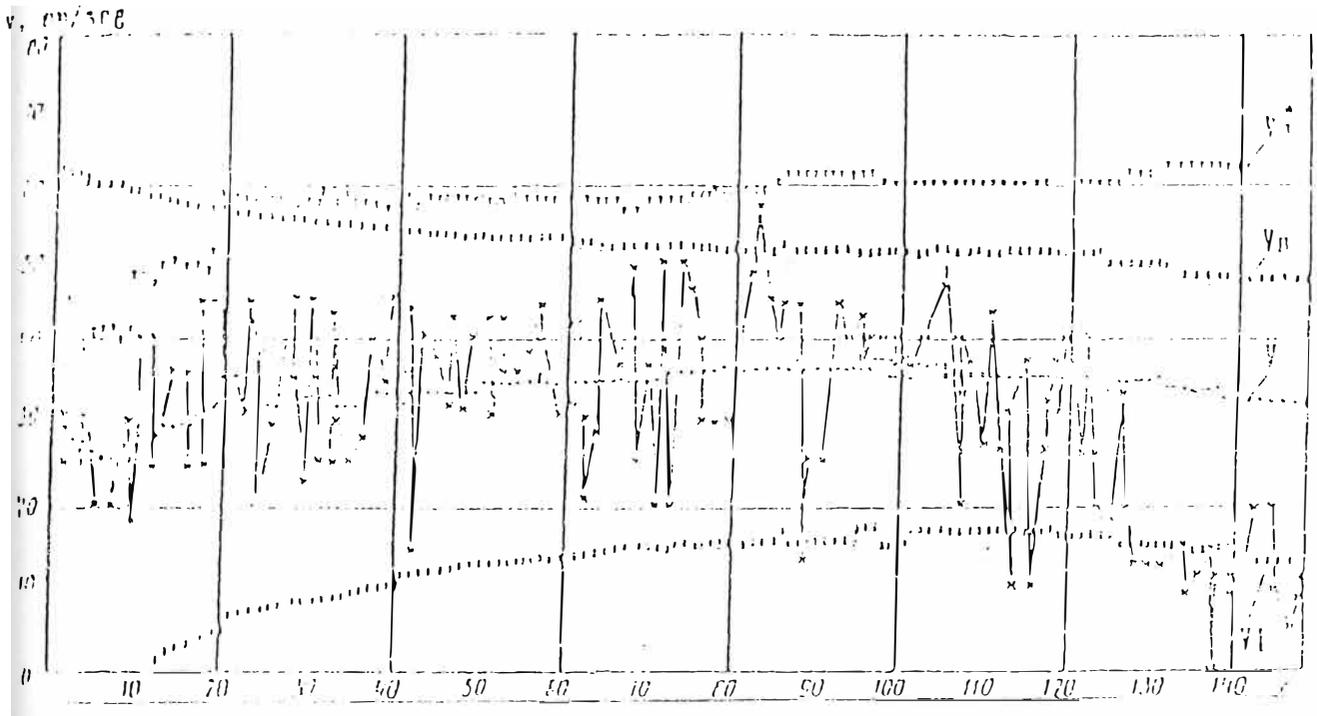


Fig. 6 VARIACION DE LA VIBRACION EN EL CASO DE FALLA DEL VIBROSENSOR:

X – indicación de la vibración; ∇ - ∇ límite de posibilidades estadísticas:

Δ - Δ - valores admisibles

Un ejemplo de la variación de la vibración del motor en el caso de falla del vibrosensor se muestra en la Fig.

Pronóstico de la variación de los parámetros vibratoriales como un proceso aleatorio. El pronóstico predice el valor aleatorio del proceso con alguna probabilidad o en el área en la cual, con una determinada probabilidad caerá el valor del proceso (Pronóstico por intervalos).

Existe algunos métodos de pronósticos del valor de los procesos; en cada método comienzan con la elaboración del modelo del proceso, después en correspondencia al modelo, elaboran las reglas del pronóstico.

El valor límite del proceso aleatorio de variación de los parámetros vibracionales (por ejemplo, las amplitudes de la vibro-velocidad) durante el proceso de operación se puede determinar y pronosticar como los tolerancias límites, que determina el área de valores del proceso en función del número de mediciones durante un constante nivel de valores.

Examinemos la variación de la tolerancia límite superior (límite superior del rango de probabilidades estadísticas de los niveles de vibración). Para que sea sencillo se puede utilizar el modelo de variación en forma de aproximación lineal de la variación del límite (para cada sección de variación vibracional) líneas punteadas en la Fig. 7)

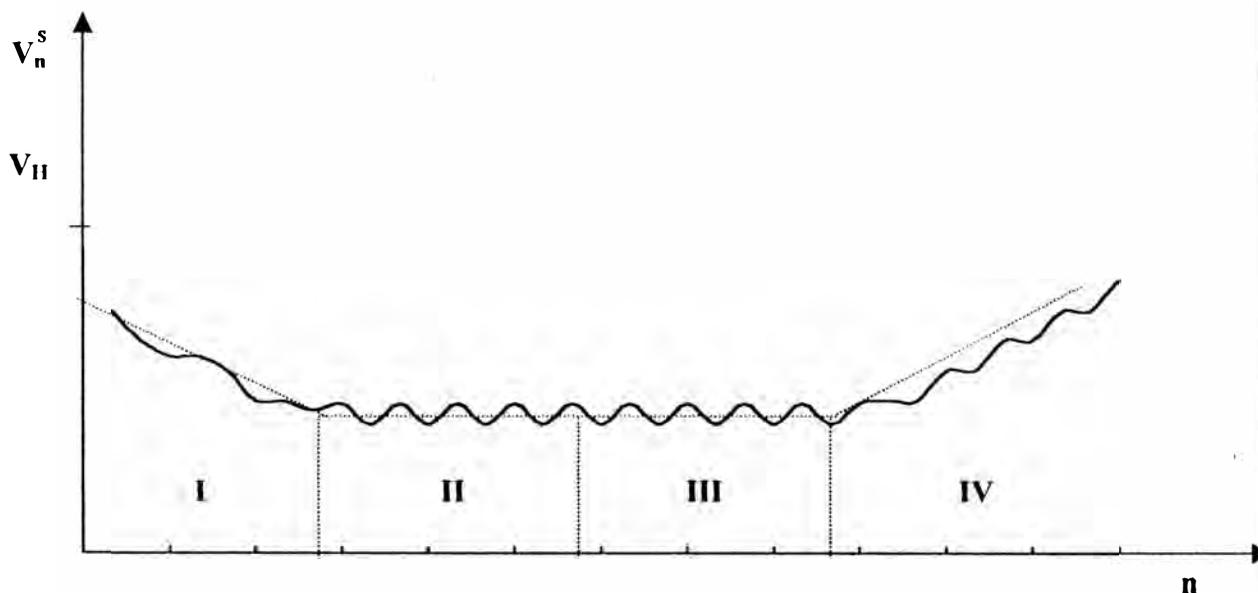


Fig 7 : Modelo de variación del límite superior en el rango de probabilidades estadísticas de los niveles vibracionales del motor:

I, Proceso de ajuste funcional; II, III – Período de explotación normal ; IV – Período de variación de la vibración durante el desarrollo del mal estado; V_{11} – nivel de vibración límite permisible por resistencia.

Considerando el modelo no estacionario propuesto, la regla del pronóstico debe predecir la variación lineal del proceso con la posibilidad de calcular el coeficiente del modelo en diferentes secciones y el cálculo de las fluctuaciones aleatorias.

Durante el proceso de variación del límite V^s se puede dividir en algunas secciones características:

1. Sección – disminución del límite a medida que se acumulan los datos informativos especialmente en la etapa inicial
2. Sección – estacionario;
3. Sección – aumento lento del límite con débil variación del valor promedio o dispersión (Durante un desarrollo débil y lento del mal estado)
4. Sección – aumento más fuerte del límite con un rápido desarrollo del mal estado).

En todas las secciones es también posible las fluctuaciones aleatorias del límite a consecuencia de la influencia de las interferencias.

Es evidente que, el pronóstico es necesario especialmente en las secciones III y IV. En la cual la magnitud y el momento del tiempo en la variación de los coeficientes indefectiblemente son impredecibles y el intervalo de tiempo en el cual el valor de los coeficientes se quedan invariables, y en forma significativa supera el intervalo entre las medidas.

Esta exigencia corresponde del método de nivelación exponencial.

La nivelación exponencial de los resultados de las observaciones se llama operación.

$$W_t = \alpha x_t + (1 - \alpha) W_{t-1};$$

Donde W_{t-1} valor nivelado de la observación, realizado en el momento t ; X_t – valor de la observación en el momento t ; anterior $t-1$; α - nivelación constante (Coeficiente de peso; $0 < \alpha < 1$).

La operación de nivelación se realiza igual para todas las observaciones y por eso:

$$W_t = \alpha \sum_{i=0}^{n-1} (1 - \alpha)^i x_{t-i} + (1-\alpha)^n X_0;$$

donde n - número de observaciones; X_0 - valor de la observación inicial (aplicado al algoritmo examinado, n -número de vuelos). La magnitud W_t es la combinación lineal de todas las observaciones, el peso de estos disminuye por progresión geométrica.

La nivelación exponencial de las observaciones repetidas se llama nivelación exponencial doble $W_t^{(2)}$.

La utilización de las operaciones de nivelación exponencial y el de nivelación exponencial doble para las observaciones, descritos por el modelo lineal, permite valorar los coeficientes desconocidos del indicado proceso y del mismo solucionar la tarea del pronóstico.

Considerando una pequeña magnitud de los valores fluctuantes casuales es posible pronosticar en el intervalo de $n_1 = 10 \div 20$ cuando $\alpha = 0.1 \div 0.2$.

CALCULO DE LAS FRECUENCIAS RELATIVAS A LOS MODELAJES

(Nº1 COMPRESOR) Y (Nº4 TURBINA)

Nº1 COMPRESOR

$$D_2 = 4.3300''$$

$$D_1 = 2.3609''$$

$$D_3 = 18''$$

$$2 \frac{d_1 \times d_2}{(d_1 + d_2) d_3} \times f_r = \frac{2 (4.33 \times 2.3609)}{2.3609 \times 0.4720} \times f_r = 6.47 f_r$$

$$f_i = N \times \frac{d_2}{d_1 + d_2} \times f_r = 11.64 f_r \quad f_e = N \times \frac{d_1}{d_1 + d_2} \times f_r = 6.35 f_r$$

$$f_{\text{rot billas}} = 3.235 f_r$$

$$T = \frac{1}{f_{\text{rot billas}}} = 0.3091 f_r$$

Nº4 TURBINA

$$D_2 = 4.3295''$$

$$D_1 = 2.3605''$$

$$D_3 = 0.4730''$$

$$N = 18$$

$$f_r = \frac{2 d_1 \times d_2}{(d_1 + d_2) d_3} \times f_R = \frac{2 (2.3605 \times 4.3295) 729}{(2.3605 + 2.3609) 0.4720} \times f_r = 6.4729 f_r$$

$$f_i = \frac{N \times d_2}{d_1 + d_2} \times f_r = \frac{18 \times 4.3295}{(2.3605 + 2.3609)} \times f_r = 11.648 f_r$$

$$f_{\text{rot billas}} = 3.2364 f_r$$

$$T = \frac{1}{f_{\text{rot billas}}} = 0.3089 f_r$$

CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

Los métodos de control y diagnóstico, la condición técnica de los MTG se destina para la ampliación de las posibilidades y la modernización de las reglas en la toma de decisiones realizados por el hombre. Para esto antes de todo, es necesario tener los datos de cómo se realiza el trabajo y la estructura conceptual de los modelos variables que describe la acción de la persona, la cual debe estar en combinación las variables que conforma el conjunto de suministro algorítmico y de programas. La toma de decisión automatizada en todos los casos está sujeto comprobaciones por el hombre de correspondencia a sus ordenes directivas y su experiencia personal.

En los vuelos con situaciones especiales la actividad del hombre puede pasar a condiciones de indeterminadas para la toma de decisiones. En estos casos sería oportuno tener modelos, relacionados con la toma de decisiones, inclusive si ellos ordenan acciones de control inexactas, pero con reserva en la confiabilidad para no empeorar la situación dada.

En la condición técnica de los MTG intervienen los subsistemas locales de funcionamiento conjunto de a bordo, terrestre-abordo y terrestres.

La función principal de estos sistemas es el mantenimiento de la seguridad de los vuelos y de los indicadores técnico-económicos dados como resultado de la explotación. Por esta razón la función es el mantenimiento de la confiabilidad de los motores en vuelo y de los indicadores técnico –económicos. Relacionado con esto el hombre, es decir, una persona o un grupo unidos por intereses profesionales, resuelven su tarea en correspondencia a cada una de las subsistemas con el mantenimiento de las tecnologías metodológicas.

En el subsistema de a bordo, el motor se examina como un objeto no recuperable y la persona, es decir parte de la tripulación que conforma el jefe de la aeronave, el ingeniero de vuelo (Mecánico de a bordo), como operador, que comanda el funcionamiento del motor, y como persona que toma la decisión sobre la condición técnica y las acciones de control para dirigir la variación a la dirección deseada.

En las situaciones especiales de vuelo el, piloto deberá realizar las acciones de control correspondientes para prevenir el paso a situaciones mucho más complejas y peligrosas, por ejemplo, situaciones de riesgo o de emergencia. En estas condiciones se deberán resolver las siguientes tareas principales:

De todo el flujo de información obtenida, tomar aquellas que conforman los indicios de variación de la condición técnica

Evaluar la veracidad y la confiabilidad de la información

Establecer las causas de la variación de la condición técnica, los cuales pueden ser compatibles y no compatibles a la acción de los factores climatológicos exteriores actuantes no calculados, que producen la alteración del proceso de trabajo del motor, son la consecuencia de su envejecimiento , desgaste, caída de objetos extraños y otros.

Determinar el tipo de variación de las condiciones técnica, el cual puede ser mal funcionamiento, inoperativo y defectuoso.

En la actualidad no existe ninguna teoría que describa en forma veraz los modelos, algoritmos y programas de mando sobre las actividades del hombre; es desconocido como el conserva, crea y obtiene las informaciones; la codifica y decodifica, realiza la transformación de las mismas, toma decisiones y elimina información almacenada, es decir a medida que se adquiere experiencia de diagnóstico disminuye la información antigua y de poco valor, genera y pronostica el desarrollo de las defectuosidades y otros. Sin embargo es conocido que el hombre siempre se encuentra al comienzo y al final del proceso de información.

En el subsistema de tierra se utiliza la información sobre los resultados de los métodos visuales de inspección y los métodos no destructivos de control presentados en forma de evaluaciones cuantitativas de la variación de la condición técnica y las descripciones cualitativas de los defectos y fallas. Esta información se conserva en la “Documentación del Motor” y se utiliza en el subsistema de tierra / bordo durante la evaluación y valorización global de la condición técnica.

En el subsistema de tierra el volumen principal de trabajo para la toma de decisiones la realiza un grupo experto, el cual según sus componentes cuantitativos y cualitativos en forma significativa se diferencia de los integrantes de una tripulación, además este grupo a diferencia de la tripulación trabaja en condiciones sicofisiológicas mucho más favorables.

La efectividad de este subsistema, como cualquier otro, depende, principalmente de la plenitud, la veracidad y de la precisión de la información de diagnóstico dispuesta. Por eso su efectividad durante la eliminación de fallas evidentes, es decir, cuando se tiene una total descripción cuantitativa de la falla o defecto, prácticamente siempre satisfacen las exigencias del mantenimiento de confiabilidad. Al mismo tiempo que, su efectividad durante la eliminación de fallas no evidente, es decir cuando no se tiene una total descripción cuantitativa de las fallas, casi siempre no satisface.

Esto puede explicarse por cuanto la solución en el segundo caso lleva un carácter de compromiso entre el riesgo de disminuir la seguridad de los vuelos por la culpa de no eliminación a tiempo de una falla oculta o el deterioro y el empeoramiento de los indicadores técnico-económico de operación por culpa del desmontaje inmediato sin fundamento del motor ó de piezas costosas de la aeronave.

Durante la evaluación integral de la condición técnica con el sistema de tierra / bordo se utilizan los parámetros de semejanza cuantitativa, cualitativa y de conversión. Como fuente de la información paramétrica de este subsistema sirven los formularios del motor, los protocolos de las pruebas en tierra de los motores, las cartas de registro manual del ingeniero de vuelo (Mecánico de Vuelo) de los parámetros del motor en

vuelo, las cintas magnéticas de los sistemas multicanales de registro de parámetros (SMRP) y otros.

Tomando en cuenta las ventajas y desventajas, en los últimos tiempos toda la gran atención se da a la creación y utilización de medios y métodos de control de condiciones del motor, en los cuales el registro y la elaboración complementaria de los datos de vuelo se realiza a bordo y la principal elaboración de la información se realiza en tierra en forma paralela con la utilización de máquinas computadoras. Esto permite utilizar algoritmos más complejos en el procesamiento de los datos y aumentar la veracidad del diagnóstico y pronóstico de las fallas del motor, también formular las recomendaciones para la realización del mantenimiento técnico. La particularidad de estos sistemas es la posibilidad de introducir la información sobre condición de los motores no solamente con los registros de abordaje, sino con los dispositivos complementarios, en los cuales se acumulan los datos, obtenidos en el proceso de mantenimiento técnico, así como también los datos estadísticos sobre la confiabilidad de los mismos.

El componente más importante y necesario de la aeronave en su planta propulsora.

Para el diagnóstico del motor y el mando sobre su estado en la explotación se debe solucionar las siguientes tareas:

Realizar el diagnóstico y pronóstico de la condición técnica.

Determinar los síntomas de los defectos o fallas

Establecer las fallas y las causas de su aparición

Realizar una evaluación operativa sobre la confiabilidad

Suministrar la transmisión de la información a un nivel jerárquico superior para el análisis y toma de decisión.

El diagnóstico y pronóstico de la condición técnica de los MTG debe realizarse de acuerdo a las metodicas sobre la variación de los parámetros funcionales y cálculos de

performance, por la variación del campo térmico de los principales elementos del motor, por la variación de los parámetros vibroacústicos del motor en su conjunto. Por los resultados obtenidos en las pruebas de control no destructivos, por los resultados de las inspecciones visuales y ópticos, por resultado de los análisis espectrométricos de aceite y otros.

Para realizar la metódica de diagnóstico es necesario disponer de información, la misma que puede ser dividida en dos tipos:

Información de vuelo

Información complementaria obtenida en tierra

A la información de vuelo es conveniente también la información registrada por la tripulación en las cartas vuelos y durante la prueba del motor en tierra. La información registrada en las grabadoras magnéticas, deben cargar automáticamente al sistema con el portador magnético.

La información de las cartas de vuelo y las cartas de la prueba del motor deben cargarse al sistema manualmente con ayuda de dispositivos periféricos especiales de entrada de datos, por ejemplo con la utilización de dispositivos teletipos.

A las informaciones complementarias, obtenidas en tierra, se refieren:

Los datos de los controles no destructivos

Los datos de las inspecciones ópticas y visuales

Los resultados del análisis espectrométrico del aceite

Discrepancias encontradas por la tripulación

Esta información debe cargarse al sistema manual con ayuda de periféricos de entrada y salida de datos.

En las condiciones de un constante perfeccionamiento en la explotación y los nuevos diseños de los motores de aviación, que tienen una construcción compleja de sus sistemas funcionales, una de las direcciones más importantes es el aumento de la seguridad de los vuelos y la efectividad de utilización de la técnica aeronáutica es la elaboración y utilización de sistemas para una temprana detección de las fallas, el pronóstico del desarrollo de las fallas y proporcionar alternativas de acciones de mando.

En la solución de problemas sobre el incremento del nivel de seguridad y regularidad de los vuelos, la efectividad económica de los transportes aéreos, la modernización de los procesos de operación de la técnica aeronáutica está directamente relacionado con los asuntos de la elaboración e implementación de métodos confiables de evaluación de la condición técnica de los MTG.

La evaluación de la condición es una operación importante del proceso tecnológico del mantenimiento técnico de los motores, determinando la cantidad de trabajo necesario. Este trabajo conforma cerca del 75% de la cantidad de trabajo necesario total del mantenimiento de la aeronave.

La elección de los fundamentos teóricos, metódicas y el suministro de equipo para el proceso de diagnóstico de la condición técnica en un grado depende del volumen y calidad de la información inicial sobre el trabajo del motor, el cual se determina como el grado del control del mismo, así como el perfeccionamiento del sistema de recolección y registro de la información.

De acuerdo a esto, durante la elaboración del sistema de diagnóstico de perspectivas MTG con una elevada capacidad de control deberían utilizarse nuevas vías, que se diferencian de las otras, las cuales se utilizan durante el diagnóstico de los motores modernos que operan en la aeronave.

ABREVIACIONES

CAP Compresor de Alta Presión

MTG Motor de Turbina a gas

MTF Motor Turbo FAN

MTH

MTR Motor Turbo Reactor

PMM Palanca de Modo del Motor

T_{AP} Turbina de Alta Presión

n_{AP} Revoluciones del Rotor de Alta Presión

n_{BP} Revoluciones del Rotor de Alta Presión

BIBLIOGRAFIAS

BIBLIOGRAFIA

1. Boletín de Servicio de Pratt & Whitney Canadá P&WC S.B. N° 1003R22 del 11/12/97
2. Boletín de Servicio de Pratt & Whitney Canadá P&WC S.B. N° 3003R17 del 21/12/94
3. Boletín de Servicio de Pratt & Whitney Canadá P&WC S.B. N° 13003R6 del 11/05/92
4. Type Certificate Data Sheet (TCDS) N° E4EA Revisión Number 18 of Pratt & Whitney Canada of January 5, 1995
5. Airborne Analytical LABS, P.O. Box 518 Merry Lane, East Hanover, NJ07936 Fax-973-386-0009.
6. Military Specification Spectrometric Oil Standards, Metric DOD-S-85694, 20 October 1986.
7. Spectrum Analyzer Model 192^a, Operation Manual Number 9107-1 Chadwick-Helmuth Company Inc. And Supplementary instructions Appendix C.
8. Boroscope Inspection Manual Pratt & Whitney Canada, Part Number PWC 34989, Reissued 11 January 1985, Pratt & Whitney Canada Inc Box 10 Longueuil, Quebec J4K 4X9.
9. Pratt & Whitney Canada, Maintenance Manual, Manual Part N° 3032842, Chapter 72-00-00 Pages 602, 603; October 17, 1997.

10. Military Specification Probe Light Kit Inspection, MIL-P-12001D, 29 March 1977.
11. Military Specification Boroscope Assemblies Cilinder Inspection MIL-B-4042E (AL), 04 November 1986.
12. Military Specification Light Source, Rigid and Flexible Fiberscope, Fiber Optic (Metric) General Specification for, Metric MIL-L-24732 (Navy), 31 August 1989.
13. Military Specification Fiberscope, Fiber Optic (Metric) General Specification for, Metric MIL-F-247344 (Navy), 31 August 1987).
14. FAA Academy Training. Manual Aircraft Maintenance Reliability Programs Manual 21813 FAA Academy Aircraft Maintenance Unit AAC-952^a Handout for Statistical Computation Review Purpuses.
15. Aircraft Maintenance and Reliability Seminar / Workshop. November 12-15, 1996. Transportation Systems Consulting Corp Vol. 1, 2, 3.
16. Mantenimiento Predictivo Basado en la Confiabilidad por el Ingeniero Ernesto Sanguinetti R., Vice-Presidente del Capitulo de Ingeniería Mecánica y Mecánica Eléctrica , Lima - Perú 1996.
17. Aircraft Technical Dictionary, Second edition, EA-ATD-2 ISBN 0-89100-124-7, by Davic Jones, James Foye, Dale Crane. AMP 1980.
18. Vocabulario Tecnico Ingles – Español, nueva edicion ampliada y revisada.
19. People, Skitts and Experience You Can Depend On Worldwide, Aviaiff a Ryder System Company.
20. ECTM System IV Versión 2.00 User Guide & Reference Manual, Copyright Pratt & Whitney Canadá inc. 1995.

21. PT6A-21/27/28 Descriptive Notes Pratt & Whitney Canadá Ltd., Part N° 3013240, Reissued May 1982.
22. Vibration Analysis Edition 1989, Institute for Nuclear Engineering and Non Destructive Testing, University of Hannover, Elbestr 38A D-3000 Hannover West Germany.
23. Seminario de Mantenimiento, Análisis Vibracional del 22 al 23 de Junio de 1998 Lima, expositor Ingeniero Pedro Vargas.
24. International Standard ISO 1940/1 “Mechanical Vibration – Balance Quality Requirements of Rigid Rotors”.
25. International Standards ISO 5406 “The Mechanical Balancing of Flexible Rotors”
26. International Standards ISO 2953 “Balancing Machines – Description and evaluation”.
27. Folleto de OLYMPUS Industrial America “Remote Visual Inspection Systems” Nevada Drive Canada 1979.
28. Aircraft Gas Turbine Engine Monitoring Systems: An Update ISBN 0-89883-999-8, 332 pp., 16 Papers, Paperbound 1988
29. SAE Manual on Shot Peening 3rd Edition
30. 920990 Expert Systems for the diagnostic of auxiliary power unit (A.P.U.) Giovanni Torella, Italian Air Force Academy.
31. 921949 Turbine Wheel Relative Temperature at freerun conditions David M Mathis, Allied-Signal Aerospace Co.

32. 922033 Comparison of Traditional And finite element solutions to random vibration problems S. K. Tsang, Dowty Aerospace Los Angeles.
33. 922034 Evaluation of Residual Stresses in Axisymmetric Bodies from post – grinding deformation by finite element method. Wieslaw M. Szydowski and Willian N. Weins, University of Nebraska Shiva Kумmar Gumate, EASI-Engineering Analyssis Services; and Arun Dhir, Brenco Inc.
34. 922048 Mathematical Methods of Relative Engine Performance Diagnostic. Louis A. Urban, Retired; and Allan J. Volponi, United Technologies Corp.
35. 920960 Philosophical Approach to the Basic Understanding of The Mechanics of Jet Propulsion Shripad Prabhakar, Indian Institute of Technology.
36. 920961 Prediction of Engine Casing Temperature of fighter aircraft For Infrared Signature Studies Shiripad Prabhakar, Indian Institute of Technology.
37. 921006 A model – based Monitoring System For Turbine Engine. Dan T. Horak, Allied-Signal Aerospace Co.
38. CURSO dictado por el Dr. Nicolai Yaroslavtsev a la Universidad de Ingeniería (Comité de PosGrado) y la Universidad Tecnológica de Aeronáutica del MOSCU (MATTI) y el Centro de formación Profesional en Turismo y Aviación Comercial (AERIA) sobre “Confiability y Diagnostico de los Motores de Turbina a Gas (MTG)” 1999 Lima – Perú.
39. H. J. Bohnstedt : Fruherkennung Von Wellenrissen Bei Turbosätzen Durch Überwachung der Schwingungen In: Allianz Berich Nr 24 (November 1987) Page 10 to 11.
40. Applied Predictive Maintenance, C 50 Workshop (1989). Carl Schenck AG. Darmstadt.

41. DIN-VDE 0530, Part14: Umlaufende Elektrische Maschinen. Mechanische Schwingungen von bestimmten Maschinen mit einer Achshöhe von 56 mm und höher; Messung, Bewertung Und Grenzwerte der Schwingstärke Beuth-Verlag GmbH, Berlin 30 W. Scheithe
42. W. Scheithe: Vibration M- A method for Early Detection of Rolling Element Bearing Features. Practice of Vibration Analysis 13 (1990) Carl Schenck AG. Darmstadt.
43. VDI 2059: Shaft Vibrations of Turbosets, Beuth-Verlag GmbH, Berlin 30,
 Part 1: Shaft Vibrations of Turbosets
 Principles for Measurement and Evaluation.
 Part 2: Shaft Vibrations of Steam Turbosets for Power Stations
 Measurement and Evaluation.
 Part 3: Shaft Vibrations of Industrial Turbosets
 Measurement and Evaluation.
 Part 4: Shaft Vibrations of Gas Turbosets
 Measurement and Evaluation.
 Part 5: Shaft Vibrations of Hydraulic Machine Sets
 Measurement and Evaluation.
44. API STANDARD 670: Vibration, Axial – Position and Bearing Temperature Monitoring Systems American Petroleum Institute, Washington, D.C. 20037.
45. ISO 7919: Mechanical Vibration of non-reciprocating machines Measurement on rotating shafts and evaluation. Beuth Verlag GmbH. Berlin 39.
 Part 1 : General Guidelines
 Part 2 : Guidelines for large steam turbine generator sets.
 Part 3 : Guidelines for coupled industrial machines
 Part 4 : Guidelines for gas turbines
46. Linde-Turbokompressoren Baureihe RW Kompakt 3 Und 4-Stufig. Druckschrift V 3801 39 679 d. Linde AG. 5000 Koin 50.

47. Soud measurement Bruel & Kjaer brochure Naerum Danmark (1989).
48. DIN 45 645/2: Einheitliche Ermittlung des Beurteilungspegels für Gerauschimmissionen. Gerauschimmission am Arbeitsplatz. Beuth-Verlag GmbH Berlin 30.
49. ISO DP 2372-1 Mechanical Vibration – Evaluation of Machine Vibration by Measurement on non-rotating parts
Part 1 General guidelines. Beuth-Verlag GmbH, Berlin 30
50. ISO 2372-2 Mechanical Vibration – Evaluation of Machine Vibration by Measurement on non-rotating parts
Part 2 Large Steam Turbine Generator Sets. Beuth-Verlag GmbH, Berlin 30
51. ISO 2372-3 Mechanical Vibration – Evaluation of Machine Vibration by Measurement on non-rotating parts
Part 3 Guidelines for rotating machines with nominal power between.
52. U. Olsen: Benefits costs and trends in condition monitoring of turbine generator sets in: 7th Internationale seminar on Hydro-electric power plants. Technical University of Vienna 1992.
53. C. Troeder U. A. : Dynamik gekoppelter Systeme VDI Berichte 603. VDI-Verlag GmbH Dusseldorf.