

УДК 629.735.33.015.075

МОНИТОРИНГ НАГРУЗОК И НАКОПЛЕННОЙ УСТАЛОСТНОЙ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ: РЕАЛИЗАЦИЯ, РЕЗУЛЬТАТЫ И ВОЗМОЖНОСТИ

© 2014 Т.И. Орлова, В.В. Стрелков, В.И. Цымбалюк

НПЦ ФГУП «ЦАГИ», г. Жуковский

Поступила в редакцию 08.09.2014

Описаны алгоритмы восстановления переменной нагруженности и накопленной усталостной повреждаемости по параметрам полета, регистрируемым на штатный аварийный накопитель. Показана их точность и приведены некоторые результаты мониторинга.

Ключевые слова: *переменное нагружение, усталостная повреждаемость, параметры полета, аварийный регистратор*

Разработка методов и средств контроля фактической нагруженности в условиях регулярной эксплуатации, получение и анализ соответствующих статистических материалов является необходимым условием повышения безопасности эксплуатации самолетов по условиям прочности конструкции (Авиационные правила АП-25, МОРС 25.571). Аналогичные работы проводятся в FAA, США [1]. Федеральное управление гражданской авиации (FAA) разработало Систему контроля действующих в эксплуатации нагрузок, которая включает сбор данных о полетных нагрузках на больших транспортных самолетах и самолетах местных авиалиний. В основу мониторинга нагрузок, выполняемого FAA, положена тензометрия отдельных экземпляров самолета данного типа в условиях регулярной эксплуатации. Это дорогостоящее мероприятие. Используемая в настоящей работе система мониторинга позволяет отслеживать переменную нагруженность каждого экземпляра самолета из парка в каждом полете. Это существенное качественное улучшение мониторинга с точностными характеристиками, соизмеримыми с тензометрией. Кроме того, данная система не требует дополнительных инвестиций, поскольку встраивается в систему экспресс-анализа полетной информации, которая существует во многих авиакомпаниях.

Орлова Татьяна Ильинична, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник.

E-mail: t_orlova@progtex.ru

Стрелков Владимир Викторович, кандидат технических наук, начальник отдела.

E-mail: v_strelkov@tsagi.ru

Цымбалюк Владимир Иванович, доктор технических наук, начальник отдела.

E-mail: v.i.tsimbalyuk@yandex.ru

Цель работы: построение оптимальных с позиций точности расчетно-экспериментальных алгоритмов восстановления переменной нагруженности самолета в условиях эксплуатации по параметрам полета, регистрируемым на штатные аварийные самописцы и разработка на их основе автоматизированных систем контроля нагрузок и расхода ресурсных характеристик агрегатов планера самолета.

Усталостная повреждаемость оценивается расчетом по общепринятым методикам: с использованием полных циклов при обработке восстановленных временных реализаций нагрузок, линейного суммирования, соотношений Одингга, степенного вида кривой выносливости (ниже приведены зависимости для металлических конструкций с показателем степени 4). Обработка полетной информации происходит при возвращении самолета на базовый аэродром (или бортовой ЭВМ после окончания полета) в рамках штатной системы «экспресс-анализа» в группах объективного контроля авиакомпаний.

Достоинства и возможности системы:

- на самолете ничего дополнительно не устанавливается (для увеличения точности потребуются увеличение частоты опроса в 2-4 раза перегрузок, угловых скоростей, углов атаки и рулевых поверхностей) и отсутствуют эксплуатационные затраты;
- можно организовать индивидуальное отслеживание расхода ресурса каждым экземпляром самолета, что дает возможность в среднем увеличить ресурс парка в 1,5-2 раза и принесет существенный экономический эффект;
- можно организовать оптимальное планирование технического обслуживания (осмотры, замены деталей с ограниченным ресурсом, доработки), что также экономически эффективно;

- повышение безопасности эксплуатации, поскольку характеристики нагруженности будут определяться с использованием существенно большего числа влияющих на нее параметров, чем это делается до сих пор, что также экономически эффективно;
- контроль нагрузок при грубой посадке (снижение финансовых потерь при остановке эксплуатации с минимизацией контрольно-восстановительных работ);
- разработка рекомендаций по стилю пилотирования (траектория набора и снижения, посадка, использование механизации, разбег и др.) с целью снижения нагрузок и повреждаемости;
- мониторинг состояния ВПП и РД аэродромов по реакции самолета;
- накопление банка данных по экстремальным нагрузкам с целью уточнения нормативных требований по статической прочности;
- можно получать материалы по статистическим характеристикам переменной нагруженности и повреждаемости с целью правильного построения программ натурных усталостных испытаний и получения достоверных характеристик усталостной прочности, что увеличивает безопасность эксплуатации.

Принятый подход организации мониторинга. Спектральный, корреляционный и регрессионный анализ результатов тензометрии при летных испытаниях показывает, что в основу мониторинга повторяемости переменных нагрузок (усталостной повреждаемости) по определяющим режимам полета могут быть положены лишь статистические связи нагруженности с интегральными силовыми факторами (перегрузками). В алгоритмах восстановления повреждаемости от сил и моментов в различных сечениях конструкции самолета используются статистические зависимости нагруженности от интенсивности и времени колебаний по режимам полета. Нагрузки функционирования восстанавливаются по параметрам полета, имеющих частот опроса параметров достаточно для их точного

восстановления и не достаточно для восстановления динамических приращений нагрузок. Повторяемость приращений переменных нагрузок (повреждаемость) определяется с некоторой погрешностью (обусловленной осреднением статистических связей) в каждом конкретном полете (режиме), которая уменьшается с увеличением числа «осредняемых» полетов.

Примеры используемых зависимостей при мониторинге усталостной повреждаемости и экстремальных нагрузок. Зависимости получены по результатам тензометрии при летных испытаниях двух современных самолетов: пассажирского и самолета-амфибии (используемого на пожаротушении). Для пассажирского самолета рассматривается нагружение нижних и верхних панелей в 6 сечениях крыла, силы и моменты в центре масс двигателей (на пилонах под крылом), усилия на носовую и главные опоры шасси. Для амфибии – изгибающие моменты в сечениях крыла и лодки, усилия на двигатель.

Средние нагрузки функционирования на режимах полета с гладким крылом и стояночные нагрузки восстанавливаются по регистрируемым за режим параметрам полета с учетом веса топлива и коммерческой загрузки. Для режимов полета с выпущенной механизацией и торможения интерцепторами делается дополнительная корректировка. В качестве примера на рис. 1 приведено отношение средних установившихся изгибающих моментов по размаху крыла на этих режимах к средним моментам при полете с гладким крылом.

На рис. 2 на примере второго сечения крыла ($Z_{отн}=0,25$) показаны некоторые из используемых зависимостей по режимам полета для определения эквивалентного по усталостной повреждаемости значения максимума отнулевого цикла изгибающего момента ($M_{изг2экв}$). Результаты приведены для нижней панели крыла (+) и верхней панели (-).

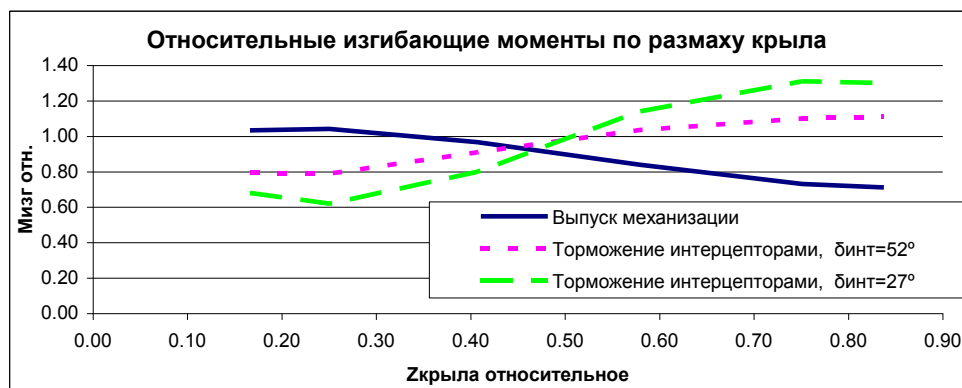


Рис. 1. Относительные изгибающие моменты по размаху крыла

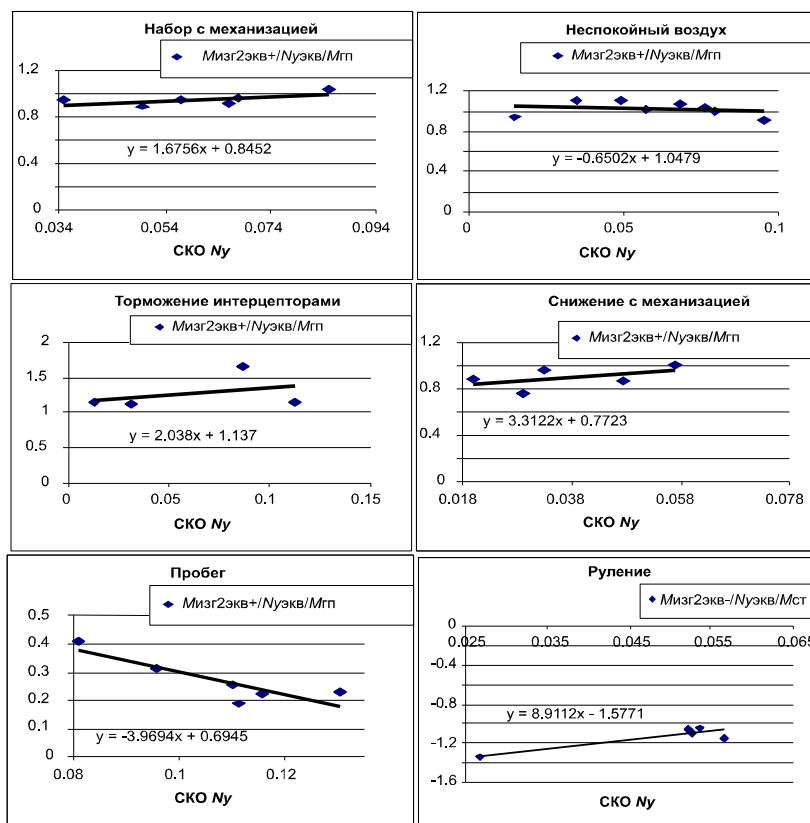


Рис. 2. Зависимости по режимам полета

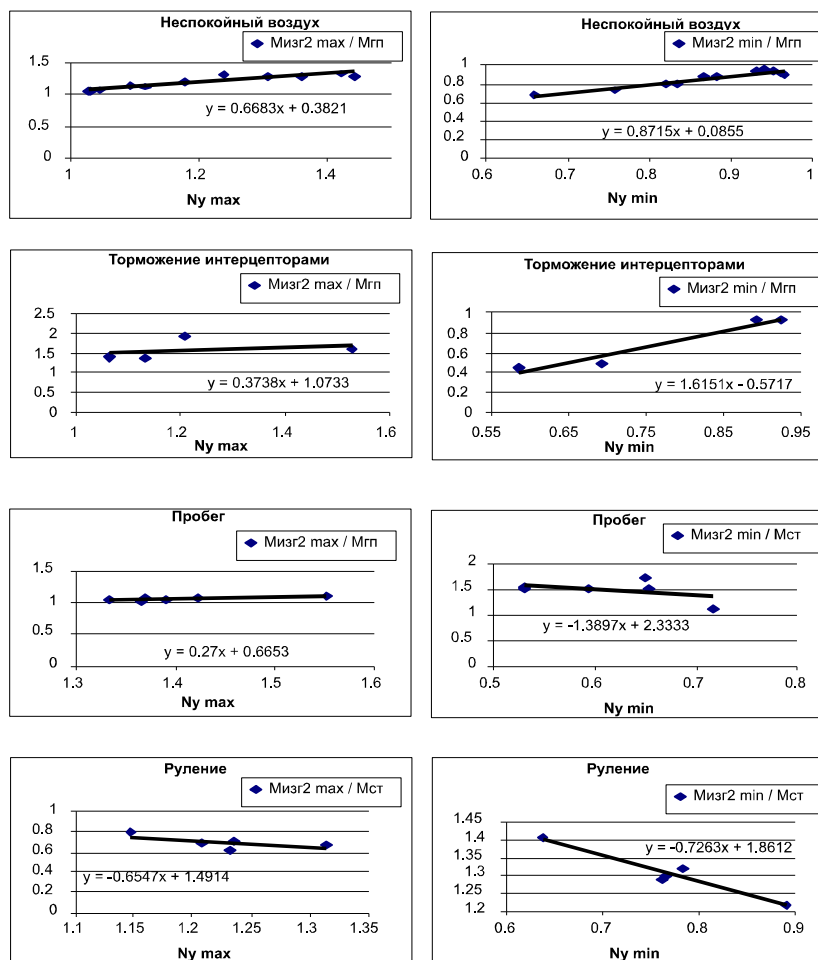


Рис. 3. Минимальные и максимальные нагрузки на разных режимах

Обозначения: Мгп – момент горизонтального полета при вертикальной перегрузке самолета $N_y=1$; Мст – стояночное значение момента; $N_{уэкв}$ – эквивалентная по повреждаемости вертикальная перегрузка; $СКОН_y$ – среднее квадратичное значение вертикальной перегрузки. Минимальные и максимальные нагрузки, используемые для восстановления повреждаемости от цикла земля-воздух-земля находятся с помощью статистических связей между экстремальными

нагрузками и экстремальными значениями перегрузок (рис. 3).

Аналогичные зависимости для эквивалентных изгибающих моментов в сечениях крыла (нерв.6-7) и лодки (Шп. 33), вертикальных (N_y двиг.) и боковых (N_z двиг.) эквивалентных перегрузок в центре масс двигателя амфибии приведены на рис. 4 (режим забора воды) и рис. 5 (сброс воды на пожар). На рис.6 показано влияние частоты опроса на условную повреждаемость по вертикальной перегрузке.

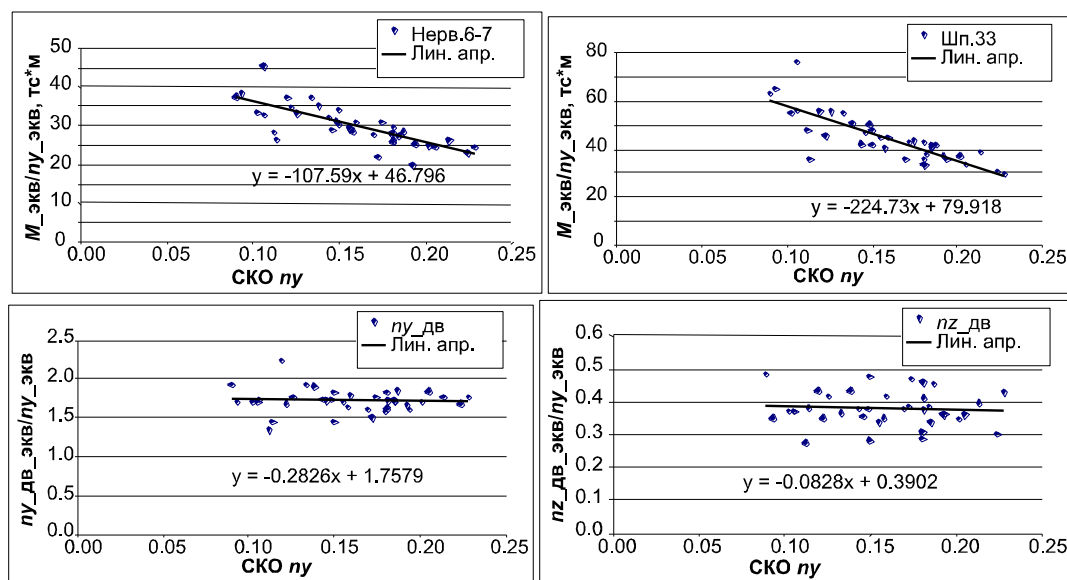


Рис. 4. Эквивалентные изгибающие моменты (режим забора воды)

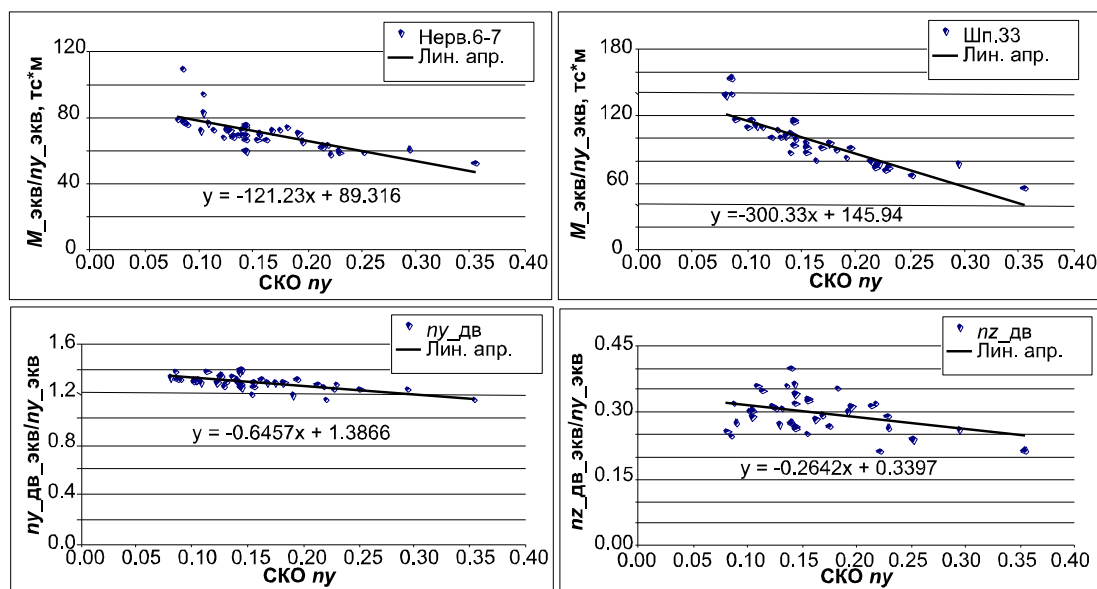


Рис. 5. Эквивалентные изгибающие моменты (режим сброса воды)

Исследование точности восстановления переменной нагруженности и накопленной усталостной повреждаемости желательно проводить, используя записи тензометрии целого полета (с момента запуска двигателей до их выключения),

а не по режимам. В табл. 1 приведен пример анализа точности системы мониторинга самолета-амфибии (СБИ – непрерывная тензометрия полета, Ресурс – вычисление по алгоритмам; 6 – полет на пожаротушение, 1 – транспортный

полет, 7 – тренировочный полет; материалы представлены Клепцовым В.И.). Видно, что с увеличением числа осредняемых полетов точность нахождения повреждаемости увеличивается (k – коэффициент равный отношению накопленной за предыдущие полеты повреждаемости, полученной в системе мониторинга, к

повреждаемости, рассчитанной по данным тензометрии). Суммарная повреждаемость за 10 полетов по сечению крыла отличается от истинной на 12% (в запас), а по сечению лодки на 3% (не в запас), в то время, как это следует из таблицы, самый тяжелый полет отличается от самого легкого в 67 раз.

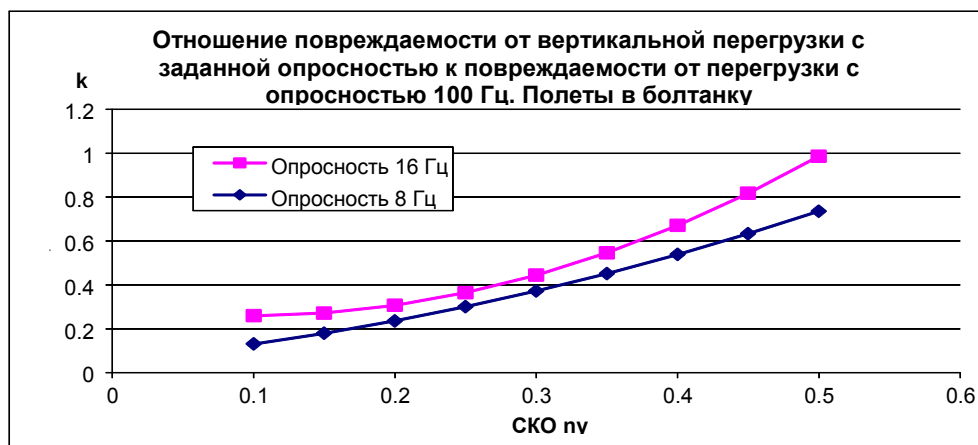


Рис. 6. Влияние частоты опроса на условную повреждаемость

Таблица 1. Анализ точности системы мониторинга

№	Тип полета	Корневое сечение крыла, Мэkv, т*м			Средняя часть лодки, Мэkv, т*м		
		СБИ	Ресурс	k	СБИ	Ресурс	k
1	6	330,6	355,0	1,330			
2	6	222,7	255,7	1,399	270,4	299,5	1,51
3	1	174,6	179,3	1,382			
4	6	271,6	276,9	1,303	307,8	287,1	1,04
5	6	307,8	310,9	1,224	300,4	293,9	0,99
6	6	342,0	340,1	1,146	315,2	316,4	1,00
7	1	151,9	151,7	1,145	211,5	213,7	1,00
8	1	140,9	143,5	1,144	192,2	174,5	0,99
9	1	211,4	190,9	1,123			
10	7	126,4	123,9	1,122	227,5	205,3	0,97

Возможности повышения точности мониторинга. Горизонтальное оперение (ГО) является одним из самых сложных агрегатов с позиций восстановления нагрузок, поскольку на него влияют скосы потока за крылом (отклонения предкрылков, закрылков, интерцепторов, колебания). Зная величины крутящих ($M_{кр}$) и изгибающих ($M_{изг}$) моментов, перерезывающих сил (Q_y) в бортовом сечении ГО, вертикальное усилие на винте механизма перестановки стабилизатора (МПС) можно определить по формуле (см. рис. 7):

$$S = 2/B * (M_{кр} * \cos(\chi) - M_{изг} * \sin(\chi) + Q_y * A), \quad (1)$$

где χ – угол стреловидности оси жесткости ГО.

На рис.8 показано сравнение усилия S , полученного в одном из режимов полета

рассматриваемого самолета непосредственно измерением и расчетом по формуле (1), используя теоретические соотношения с поправками некоторых аэродинамических производных по результатам летных испытаний. Частота опроса тензометрии и параметров полета 64 Гц. Демонстрируется очень хорошее соответствие не только по нагрузкам функционирования (которое можно еще улучшить, учитывая несимметричность обтекания левой и правой половин ГО), но и по динамическим наложениям нагрузок. Т.е. увеличение частоты опроса ведущих параметров, регистрируемых на аварийный или эксплуатационный накопитель, позволит отказаться от статистических подходов в мониторинге и повысить точность восстановления повторяемости переменных нагрузок в каждом конкретном полете.

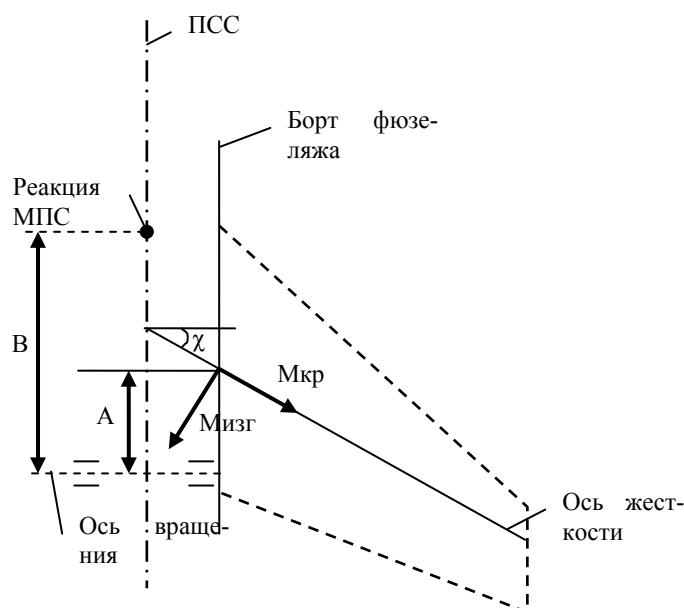


Рис. 7. Крутящие и изгибающие моменты в бортовом сечении ГО

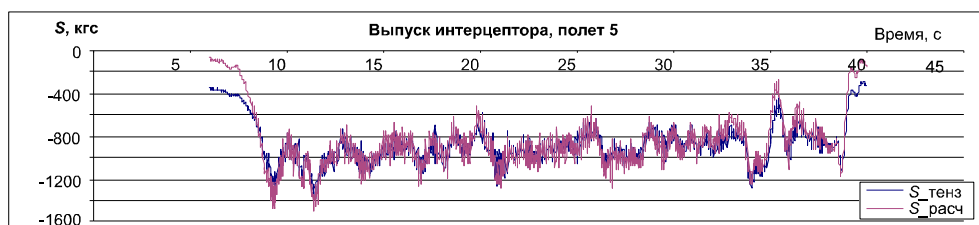


Рис. 8. Сравнительный анализ усилия S

Статистические закономерности переменного нагружения в реальной эксплуатации. На рис. 9 и 10 представлены интегральные частоты максимальных перегрузок за воздушные и наземные режимы. На рис. 11 и 12 показаны связи максимальных перегрузок с условной повреждаемостью по перегрузке (повторяемостью).

Основные положения, используемые при разработках квазислучайных программ натурных усталостных испытаний, сформулированы ~ 30 лет назад [2] и не подтверждаются

исследованиями нагруженности в реальных условиях эксплуатации:

- не подтверждается логарифмически нормальный закон максимальных за полет нагрузок (см. рис. 9 и 10);

- не подтверждается «подобие» повторяемости нагрузок: максимальной нагрузке не соответствует максимальная повторяемость (в таких программах максимальная повторяемость в сотни раз превышала среднюю повторяемость, в то время как из рис. 11 и 12 следует, что это отношение не превышает 10, а при максимальной перегрузке составляет 3-5).

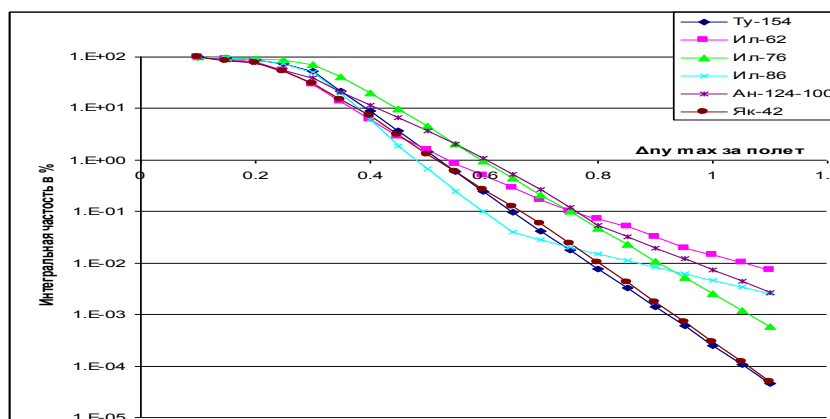


Рис. 9. Интегральные частоты максимальных перегрузок (воздушный режим)



Рис. 10. Интегральные частоты максимальных перегрузок (воздушный режим)

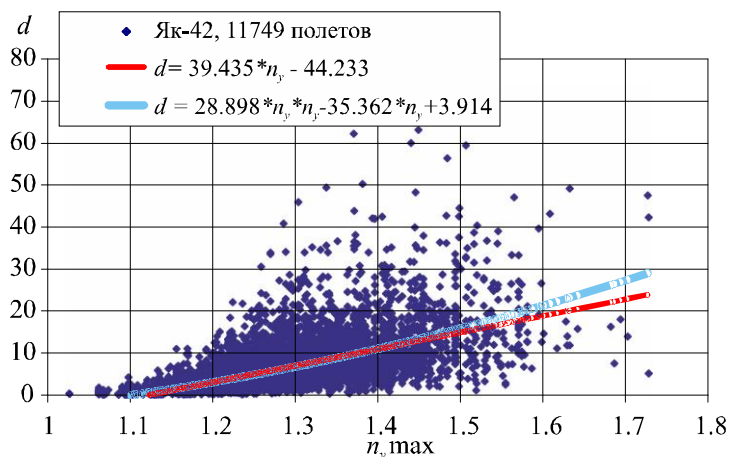


Рис. 11. Повреждаемость в воздухе

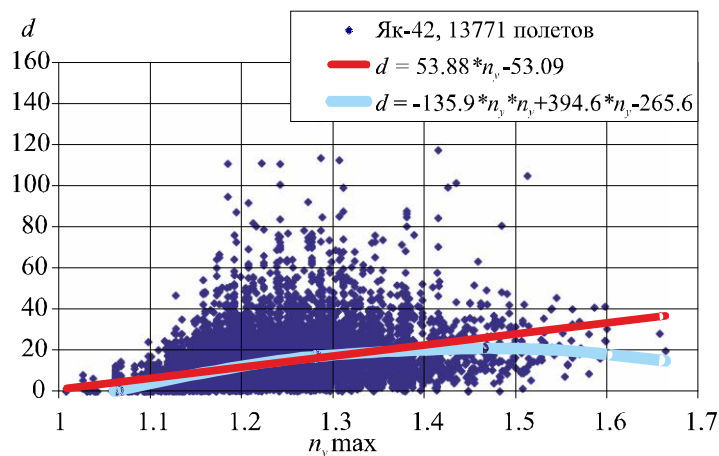


Рис. 12. Повреждаемость на земле

На рис. 13 приведены результаты рассеивания индивидуальной нагруженности (на основании обработки записей вертикальной перегрузки штатного регистратора МСРП с 27 бортов самолета Як-42 четырех авиакомпаний с суммарным налетом ~ 15000 полетов). Видно, что в данных конкретных условиях самый нагруженный борт превышает среднюю нагруженность в воздухе в 1,6 раза, а на земле – в 1,9 раза, что необходимо учитывать при установлении ресурса парку самолетов и при проведении регламентных работ.

Результаты мониторинга повторяемости нагрузок в сегодняшней эксплуатации. Проведена обработка реализаций вертикальных перегрузок самолета по данным штатного аварийного регистратора в условиях реальной эксплуатации с получением условной повреждаемости. Частота опроса равна 8 Гц, датчик стоит в районе 10 шпангоута (для поправки полученных значений на частоту опроса необходимо их увеличить в 4 раза). Обработано 2600 полетов современного самолета.

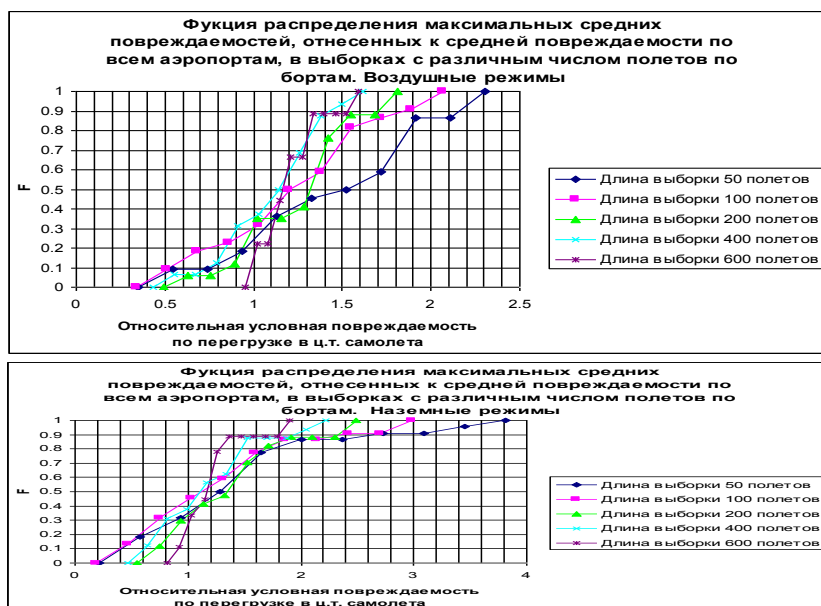


Рис. 13. Рассеивание между экземплярами самолета

Из приведенной информации на рис. 14 следует:

- повторяемость нагрузок (усталостная повреждаемость) на аэродромах России в 1,32 раза выше, чем на всех остальных аэродромах («Европа») и в 2,08 раза выше, чем в «старой Европе» (исключены аэродромы бывших республик СССР);
- повторяемость нагрузок (усталостная повреждаемость) на аэродроме Раменское (где проводятся «МАКС»ы) в 1,23 раза выше, чем в среднем по России;

- в случае базирования авиакомпаний в разных аэропортах усталостная повреждаемость планера и шасси на наземных режимах эксплуатации может отличаться в разы, что говорит о необходимости мониторинга;
- необходим ремонт аэродромов Краснодар, Нижний Новгород, Волгоград, Самара, Челябинск, Новосибирск, Тюмень, Раменское (самым хорошим аэродромом оказался Геленджик – построен 3 года назад).

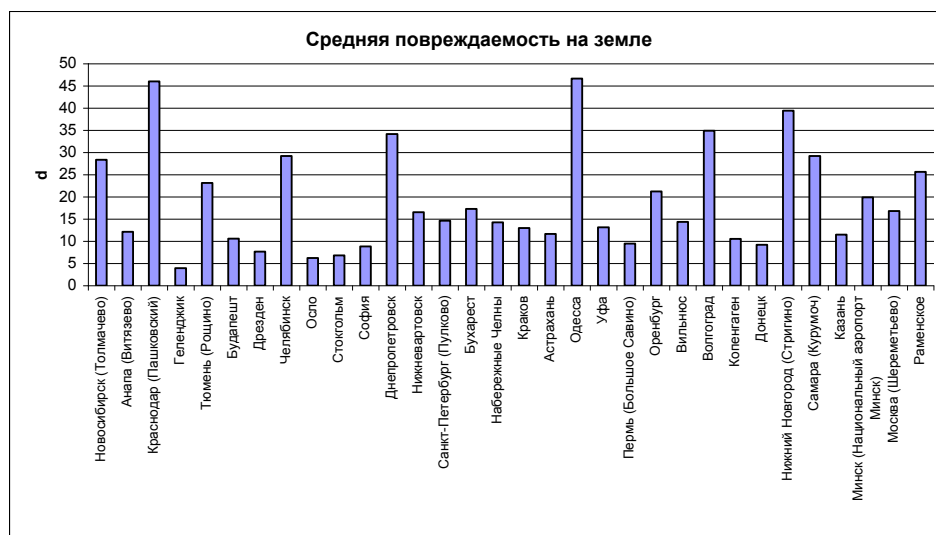


Рис. 14. Средняя повреждаемость на земле

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. <http://aar400.tc.faa.gov/Programs/AgingAircraft/airboredata/FAA%20HTML%20Design%20Template5a.htm>
2. Fowler, K.R. Development of Jet Transport Airframe Fatigue Test Spectra / K.R. Fowler, R.T. Watanabe // ASTM STP, 1006, Philadelphia, 1989.

MONITORING OF LOADINGS AND ACCUMULATED FATIGUE DAMAGEABILITY UNDER OPERATING CONDITIONS: REALIZATION, RESULTS AND OPPORTUNITIES

© 2014 T.I. Orlova, V.V. Strelkov, V.I. Tsymbalyuk

SPC FSUE “TsGI”, Zhukovskiy

Algorithms of restoration the variable loading and accumulated fatigue damageability in the parameters of flight registered on the regular flight recorder are described. Their accuracy is shown and some results of monitoring are given.

Key words: *variable loading, fatigue damageability, flight parameters, flight recorder*

*Tatiana Orlova, Candidate of Technical Sciences, Leading Research Fellow. E-mail: t_orlova@progtech.ru
Vladimir Strelkov, Candidate of Technical Sciences, Head of the Department. E-mail: v_strelkov@tsagi.ru
Vladimir Tsymbalyuk, Doctor of technical Sciences, Head of the Department. E-mail: v.i.tsimbalyuk@yandex.ru*