

Выставка Hannover Messe, апрель 2015 г. Альрик Даниельсон, Президент и Главный исполнительный директор SKF Group, представляет программу SKF EnCompass Field Performance Programme и новую обобщённую модель SKF для расчёта ресурса подшипников.



## Шаг вперёд в расчёте ресурса подшипников

На недавно прошедшей выставке-ярмарке Hannover Messe в Ганновере (апрель 2015 г.) Альрик Даниельсон, Президент и Главный исполнительный директор SKF Group, и Бернд Стефан, Старший вице-президент подразделения SKF Group Technology Development, объявили о запуске концепции обобщённой модели SKF для расчёта ресурса подшипников. Эта инновационная модель разработана для того, чтобы дать возможность инженерам производить более точные расчёты номинального ресурса подшипников. Новая модель является серьёзным прорывом в данной отрасли и позволит производителям оборудования и конечным пользователям более точно подбирать подшипники в соответствии с условиями их применения.

**НОВАЯ МОДЕЛЬ**, которая основана на используемой в настоящее время модели для расчёта ресурса подшипников и разработана в рамках новой программы SKF EnCompass, позволяет успешно разделять поверхностные и подповерхностные режимы отказа подшипников. Данная модель анализирует большее количество параметров и, тем самым, предлагает новый подход к расчёту номинального ресурса подшипников.

Презентация концепции, состоявшаяся в Ганновере, включала в себя два интервью со специалистами по обобщённой модели SKF для расчёта ресурса подшипников (GBLM), демонстрацию применения метода расчёта с помощью ПО, а также непосредственное общение с клиентами и журналистами. Представленная концепция модели была благосклонно принята публикой и клиентами, что продемонстрировало живой интерес к вопросу оценки ресурса подшипников.

Ниже приведено описание основных принципов, на которых построена данная модель. →

# Обобщённая модель SKF для расчёта ресурса подшипников

**ДО НАСТОЯЩЕГО ВРЕМЕНИ** оценка ресурса подшипников качества производилась на основе инженерных моделей, которые рассматривают эквивалентное нагружение области контакта качения, возникающее под контактной поверхностью. На протяжении многих лет усталостный износ поверхности, вызванный воздействием загрязнений или условиями неправильного смазывания, учитывали при расчёте ресурса подшипников с помощью дополнительного коэффициента, применяемого к общему эквивалентному нагружению в зоне контакта качения. В модели расчёта решение данной проблемы представлено посредством разработки общего подхода к оценке ресурса контакта качения, в рамках которого поверхностные повреждения отражаются в базовых формулах расчёта усталости в зоне контакта качения. Такая трактовка позволяет более наглядно представить характеристики трения подшипников качения при расчёте их ресурса. Кроме того, она даёт больше информации о характеристиках поверхностной износостойкости, которые являются первостепенными эксплуатационными характеристиками подшипников качения. В настоящее время обсуждается возможность данного метода учитывать характеристики трения и других механизмов поверхностной и подповерхностной усталости, присутствующих подшипникам качения.

Современные подшипники

качества обеспечивают всё более надёжную работу при условии их правильного использования и надлежащего смазывания. Это связано с использованием передовых методик, а также с хорошим пониманием воздействия традиционных усталостных механизмов в зоне контакта качения. Помимо прочего этому способствуют повышенная чистота материала, высокое качество изготовления, а также применение надёжных методов расчёта ресурса. Однако последние промышленные тенденции, связанные со стремлением к уменьшению размеров и повышению работоспособности, предъявляют ещё более строгие требования к подшипникам качения, в особенности к их контактным поверхностям. Именно поэтому большинство неисправностей и отказов подшипников относятся к категории поверхностных [1]. Для того, чтобы подшипники качения не становились помехой на пути к дальнейшему увеличению производительности современного оборудования, необходимо использовать улучшенные методы оценки характеристик трения поверхностей подшипников с учётом их эксплуатационных характеристик. За последние десять лет компания SKF добилась значительных успехов в области моделирования режимов эксплуатации, влияющих на разрушение поверхности и ресурс подшипников [2-8]. В конечном счёте, обобщённая модель SKF для расчёта ресурса

подшипников позволила применить эти знания при расчёте номинального ресурса подшипников качения [9] и разделить поверхностные и подповерхностные режимы повреждений. Это даёт возможность применять к этим двум областям различные физические модели. Характеристики подповерхностной усталости в зоне контакта качения могут рассматриваться в обычном порядке на основе классической модели динамической грузоподъёмности Лундберга и Палмгрена [10], в то время как рассмотрение поверхностных характеристик предусматривает использование более передовых трибологических моделей, способных учитывать сложные физические взаимодействия, происходящие в сильно нагруженных контактах Герца, такие как смазывание, трение, износ, усталость или приработка.

Это позволяет SKF отразить при прогнозировании ресурса подшипников особые характеристики конструкции, которые способны повлиять на эксплуатационные параметры подшипников в различных условиях их применения. Примерами являются подшипники со специальной термообработкой, с передовой микрогеометрией или подшипники особой конструкции или качества.

Наши клиенты смогут воспользоваться преимуществами различных уникальных особенностей подшипников SKF, представленных в каталоге про-

дукции, и учитывать данные особенности в своих расчётах ресурса подшипников. В конечном итоге, наши клиенты смогут найти более подходящее применение характеристикам и качеству продукции SKF, которые невозможно представить только лишь в виде одной «подповерхностной» динамической номинальной нагрузки (С), как это делается сегодня [11].

Особенность нового подхода, связанная с возможностью более детального рассмотрения механизмов разрушения и трибологии поверхности дорожек качения, позволит использовать усовершенствованную версию обобщённой модели для расчёта ресурса подшипников в процессе их разработки.

Инженеры SKF будут использовать данную обобщённую модель при разработке усовершенствованных конструкций подшипников для особых условий применения или особых требований к их эксплуатационным характеристикам. Одним словом, данная обобщённая модель представляет собой современный, гибкий инструмент для расчёта эксплуатационных характеристик подшипников и обеспечивает возможность интеграции новых знаний и технологий по мере их возникновения и развития.

### Обобщённый подход к моделированию

В новой модели также будет применяться стандартизированный вероятностный метод, использовавшийся до сих пор для оценки номинального ресурса подшипников качения с учётом модели распределения Вейбулла по двум параметрам, как описано в пункте [12]. Валодди Вейбулл [13] ввёл стохастические концепции определения прочности и разрыва конструкционных элементов на основе теории слабого звена.

Если конструкция состоит из  $n$ -ого числа элементов, подверженных различным нагрузкам,

то при различной вероятности безотказной работы  $S_1, S_2, \dots, S_n$  в соответствии с законом надёжности изделия вероятность безотказной работы всей конструкции будет выражаться формулой (1).

Лундберг и Палмгрен в своей классической исходной формуле базовой динамической номинальной нагрузки подшипников качения [10] применили закон надёжности изделия Вейбулла (формула 1), для того чтобы получить функцию безотказной работы конструкции, состоящей из  $n$ -ого числа независимых физических элементов, и чтобы данная функция отражала процесс разрушения при циклах нагружения от 0 до  $N$  (формула 2).

Объём  $V$  может быть разделён на два и более независимых источника риска разрушения конструкции. Допустим, что  $G$  является функцией разрушения материала, обуславливающей последствия накопления циклов нагружения (усталости). Таким образом, различные области могут характеризоваться различными функциями разрушения

материала, описывающими различные процессы разрушения (или один процесс)  $G_{v,p}, G_{v,2}, \dots, G_{v,n}$ . Совокупный эффект данных функций на безотказную работу всей конструкции может быть выражен с помощью формулы (2). Теперь допустим, что имеются только две области, первая из которых является подповерхностной (область  $v$ ), а вторая – поверхностной (область  $s$ ), и тогда получаем результат, описанный в формуле (3).

В соответствии со ссылкой [14] объёмный интеграл усталостного разрушения может быть вычислен на основе амплитуды напряжения  $\sigma_v$ , полученного из поля напряжения по Герцу (формула 4).

Где  $c$  и  $h$  – экспоненты,  $e$  – наклон Вейбулла для подповерхностной области,  $N$  – ресурс контакта на протяжении определённого числа циклов нагружения,  $z$  – глубина анализа,  $V_v$  – интегральный объём,  $\sigma_{u,v}$  – предел усталости при заданном объёме и  $\bar{A}$  – заданная константа.

$$S_1^n = S_1 \cdot S_2 \cdots S_n = \prod_{i=1}^n S_i \quad (1)$$

$$\ln \left[ \frac{1}{S(N)} \right] = \ln \left[ \frac{1}{\Delta S_1(N)} \right] + \ln \left[ \frac{1}{\Delta S_2(N)} \right] + \cdots + \ln \left[ \frac{1}{\Delta S_n(N)} \right] \quad (2)$$

$$\ln \left[ \frac{1}{S(N)} \right] = \int_{V_v} G_v(N) dV_v + \hat{h} \int_A G_s(N) dA \quad (3)$$

$$\int_{V_v} G_v(N) dV_v = \bar{A} N^e \int_{V_v} \frac{\langle \sigma_v - \sigma_{u,v} \rangle^c}{z^h} dV_v \quad (4)$$

$$\hat{h} \int_A G_s(N) dA = \bar{B} N^m \int_A \langle \sigma_s - \sigma_{u,s} \rangle^c dA \quad (5)$$

Аналогичным образом мы можем переписать функцию повреждения поверхностной области. Если константа  $\bar{h}$  включена в константу пропорциональности поверхностного повреждения  $\bar{B}$ , мы получим формулу (5).

Где  $m$  – наклон Вейбулла для поверхностной области,  $A$  – интегральная поверхность,  $\sigma_{u,s}$  – предел усталости на заданной поверхности и  $\bar{B}$  – заданная константа.

Поверхностные напряжения  $\sigma_s$  в функции поверхностного повреждения (5) определяются исходя из фактической геометрии поверхности контакта и напряжений трения.

Теперь, объединив формулы (4) и (5) в формулой (3), мы можем получить формулу расчёта ресурса контакта с отдельными условиями для поверхностной и подповерхностной областей. Обратите внимание, что ресурс в миллионах оборотов может быть соотнесён с числом циклов нагружения в виде отношения  $L = N/u$ , где  $u$  – количество циклов нагружения на оборот. Учитывая, что два угла наклона Вейбулла практически аналогичны  $e = m$ , что само по себе является отражением соответствующих поверхностных видов повреждений, в конечном итоге получаем формулу (6).

Эти вычисления лежат в основе модели расчёта ресурса подшипников, которая чётко разделяет поверхностные и подповерхностные виды отказов. Условие подповерхностной области, выражаемое в виде объёмного интеграла, может удовлетворяться аналогично

тому, как описано в работе [14], с помощью традиционных методов определения усталости зон контактов качения по Герцу. При этом условие поверхностной области, выражаемое в виде интеграла площади, теперь позволяет нам последовательно включать в нашу модель многочисленные трибологические явления, характеризующие износостойкость поверхности дорожки качения.

Разумеется, данная методика предусматривает использование передовых численных моделей. Эти модели необходимы для отображения сложного взаимодействия различных механизмов разрушения. К подобным механизмам могут относиться, например, i) поверхностная усталость в сочетании с умеренным износом, ii) процесс разрушения от вмятин, iii) трибохимические взаимодействия и многие другие. Основная концепция обобщённой модели для расчёта ресурса подшипников схематически представлена на рис. 1.

### Модели поверхности

Численная модель поверхностного повреждения с учётом усталости и умеренного износа описана в работе [5]. В качестве входных данных для данной модели должны использоваться оцифрованные карты шероховатости контактных поверхностей (рис. 2). Данная модель позволяет решить эластогидродинамическую задачу для режима смешанного трения (с учётом неньютоновской реологии).

Решение данной задачи выполняется с временными шагами расчёта давления и напряжений.

В расчётной модели применяется критерий повреждения и модель износа для обновления поверхностной топографии и переход к следующему временному шагу расчёта до полного завершения цикла нагрузки перекачивая. Данный численный процесс повторяется миллионы раз для каждой расчётной точки поверхности. Это позволяет обеспечить хорошую имитацию физических явлений процесса накопления повреждений на поверхности дорожки качения, связанных с износом и усталостью, для каждого заданного числа перекачиваний. Результаты данной численной модели показаны на рис. 3, где последние сравниваются с результатами испытаний, проведённых при тех же условиях численного моделирования.

К другим возможным моделям поверхности относятся модели [3, 6, 7]. Результаты расчётов данных моделей интегрируются в обобщённую модель для определения ресурса подшипников. Для большей наглядности в качестве примера гибкости обобщённой модели с точки зрения интеграции передовых моделей повреждения поверхности рассмотрим модель поверхностных повреждений [5]. Данная модель использовалась для проведения параметрического исследования с различными эксплуатационными условиями, с шероховатостью разных типов и размеров подшипников, а также различных режимов смазывания и загрязнения [9]. В рамках данного параметрического исследования интеграл поверхностной усталости был нормализован и приведён в соответствие с кривой указанной ниже функции с помощью параметров подшипников (формула (7)).

В данной формуле  $f_1, f_2, \dots, f_5$  – константы,  $P$  – эквивалентная динамическая нагрузка на подшипник,  $P_u$  – предел усталостной прочности подшипника. Параметр  $R_s$  отражает величину риска повреждения поверхности, то есть является величиной напряжений, действующих на рабочие поверхности подшипника.

$$L_{1-s} = \frac{[\ln(\frac{1}{s})]^{1/e}}{u} \left[ \bar{A} \int_{V_v} \frac{(\sigma_v - \sigma_{uv})^c}{z^h} dV_v + \bar{B} \int_A \langle \sigma_s - \sigma_{u,s} \rangle^c dA \right]^{-1/e} \quad (6)$$

$$R_s = f_1 \exp \left[ \frac{f_2}{(P/P_u)^{f_3}} + \frac{f_4}{(P/P_u)^{f_5}} \right] \quad (7)$$

Передовая модель повреждения поверхности позволяет рассчитать различные режимы смазывания и условия загрязнения подшипника, а также определить их воздействие на вероятность безотказной работы поверхности. Таким образом, введение параметра  $\eta = \eta_b \eta_c$  [3] (для обозначения повышенного или пониженного риска взаимодействия поверхностей) позволяет представить формулу (7) в качестве функции безразмерной эквивалентной нагрузки  $P_v/P$  для конкретного типа подшипника, см. рис. 4.

### Коэффициенты полезного действия

Уникальные особенности конструкции подшипников SKF могут впоследствии учитываться в рамках описанной выше методологии для получения особых расчётных «коэффициентов полезного действия» (КПД). Подобные коэффициенты могут разрабатываться для оптимального учёта работоспособности конкретных конструктивных особенностей и особых условий эксплуатации.

Как правило, данные коэффициенты применяются к оценке характеристик поверхности, полученных, к примеру, в результате применения новых методов термообработки или новых материалов для повышения твёрдости дорожки качения, а также при нанесении покрытия, внедрения усовершенствованной микрогеометрии дорожки качения и специальной обработки поверхности. При этом особые коэффициенты полезного действия в будущем могут также использоваться и для подповерхностной области и даже в отношении отдельных аспектов смазочных материалов и процесса смазывания. В целом, структура обобщённой модели для расчёта ресурса подшипников позволяет последовательно включать в неё новые технологии в области производства подшипников и прогнозирования их ресурса по мере появления последних.

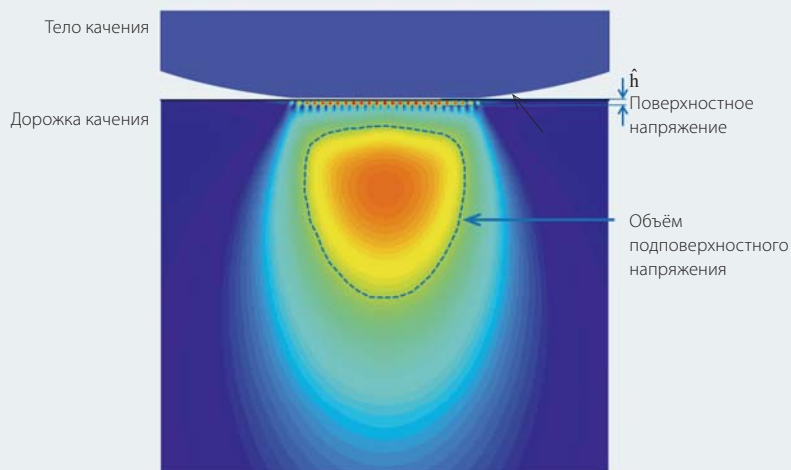


Рис. 1. Разделение поверхностных и подповерхностных условий в обобщённой модели SKF для расчёта ресурса подшипников

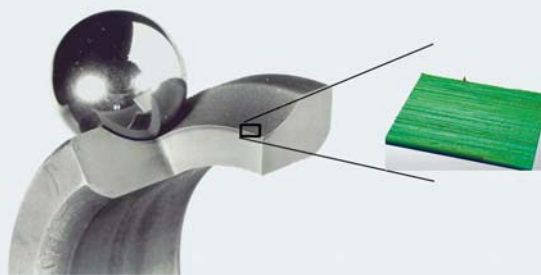
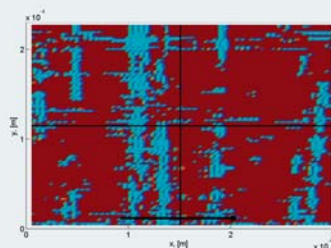


Рис. 2. Оцифровка шероховатости дорожки качения подшипника с помощью оптического профилометра для трёхмерного моделирования поверхности



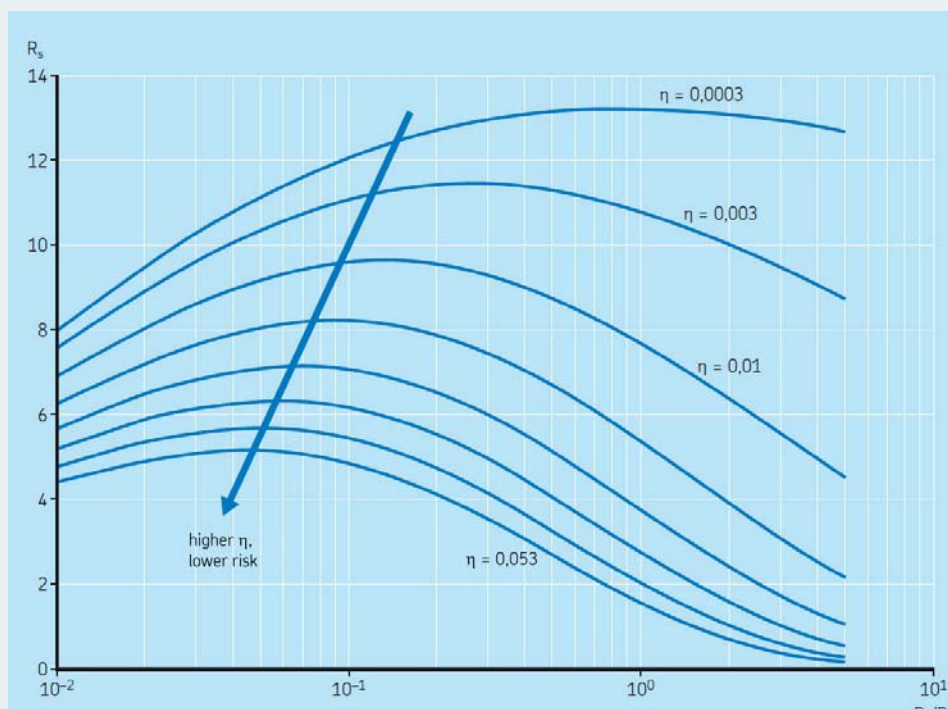
(a) Результаты расчётов модели



(b) Результаты испытания

Рис. 3. Результаты расчётов передовой модели повреждения поверхности (см. [5]).

**Рис. 4. Пример расчёта риска повреждения поверхности как функции величины нагрузки и режимов смазывания/загрязнения.**



В качестве примера коэффициента полезного действия, относящегося к вероятности безотказной работы поверхности дорожки качения, можно рассмотреть внедрение дорожки качения подшипников с повышенной твёрдостью, то есть с улучшенными показателями износостойкости и устойчивости к загрязнению, в частности, в условиях недостаточного смазывания. Информация об ожидаемых улучшенных эксплуатационных характеристиках износостойкости поверхности может использоваться в качестве коэффициента в формуле (7), например, коэффициента, снижающего риск возникновения повреждения поверхности, см. рис. 5.

Обратите внимание на то, что в данном конкретном случае КПД был разработан только в отноше-

нии одного диапазона рабочих условий подшипника. Как показано на рис. 5, наиболее существенное снижение величины риска повреждения поверхности приходится на область высокого риска для поверхности; с увеличением значения параметра  $\eta$  и снижением риска уменьшается и влияние КПД. Последнее указывает на способность данного коэффициента обобщённой модели для расчёта ресурса подшипников учитывать конкретные условия неправильного смазывания или сильного загрязнения подшипника, при которых ожидается более значительное снижение риска повреждения поверхности.

**Нормализованный риск повреждения поверхности**  
Благодаря тому, что обобщённая

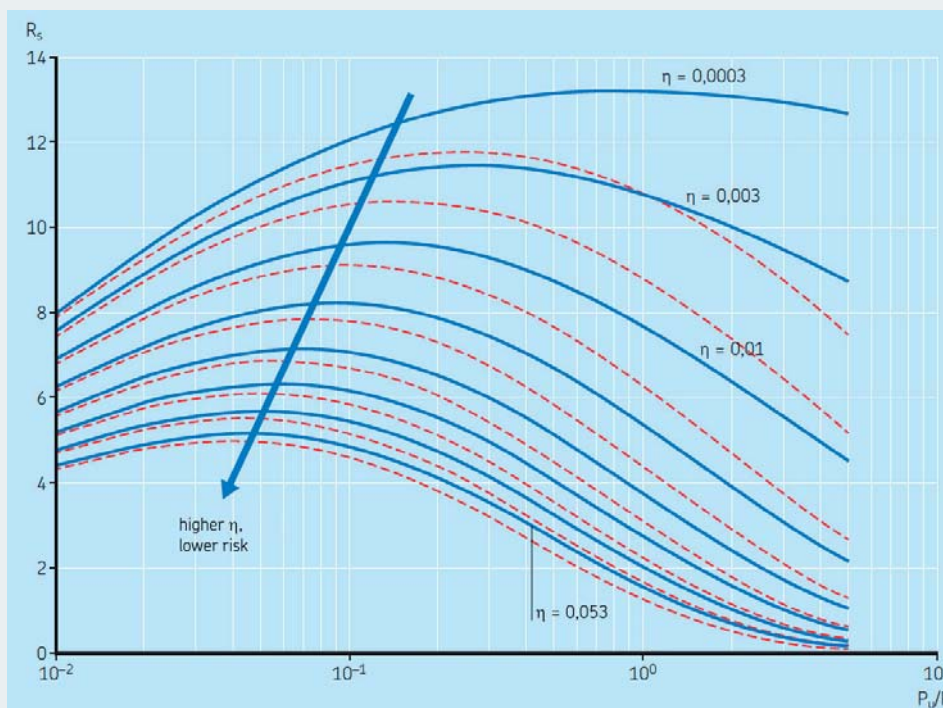
модель для расчёта ресурса подшипников способна различать условия поверхностной и подповерхностной износостойкости, мы можем определить их относительное воздействие на общие динамические характеристики подшипника.

Например, можно вывести нормализованную величину риска повреждения поверхности по формуле (8), где i)  $R_s$  – нормализованный интеграл поверхности или риск повреждения поверхности, ii)  $R_{ss}$  – нормализованный интеграл подповерхностного напряжения или риска подповерхностного повреждения и iii)  $c$  – коэффициент масштабирования.

Значение данного параметра может изменяться в диапазоне от 0 до 1. Когда оно близко к 1, поверхностная усталость преобладает над подповерхностной; если значение ближе к 0 – наоборот. Этот параметр важен для понимания того, какой именно области напряжения подшипника присущ более высокий

$$S_R = \frac{cR_s}{R_{ss}} \quad (8)$$

**Рис. 5. Пример расчёта риска повреждения поверхности как функции величины нагрузки и режимов смазывания/загрязнения. Красным пунктиром выделены воздействия КПД в результате использования термической обработки для улучшения твёрдости поверхности дорожки качения.**



уровень риска. Обладая такой информацией, инженеры и клиенты могут спланировать корректирующие действия, направленные на повышение работоспособности подшипника и снижение расходов.

### Оценка работы модели

При аналогичных условиях эксплуатации новая обобщённая модель SKF демонстрирует результаты, близкие существующей модели расчёта, а также в значительной степени моделям расчёта ресурса по стандарту ISO 281. Это обусловлено тем, что обобщённая модель для расчёта ресурса подшипников была выведена с помощью обширной базы данных результатов ресурсных испытаний SKF. Эта база данных непрерывно пополняется и обновляется с учётом последних разработок в области технологий изготовления подшипников.

Внедрение коэффициентов полезного действия впоследствии приведёт к изменению прогнозируемого ресурса. Одна-

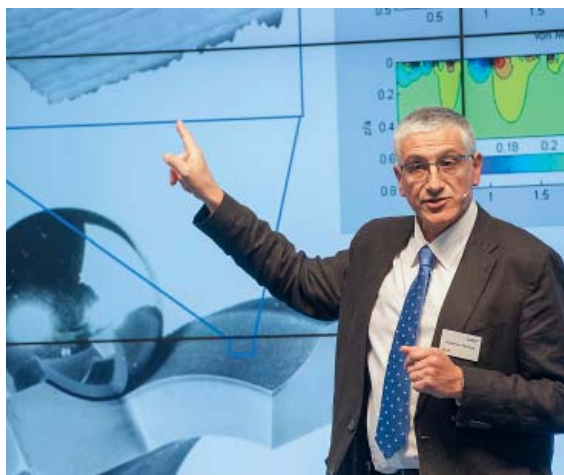
ко такое изменение является следствием модификаций эксплуатационных характеристик, полученных благодаря новым конструктивным особенностям подшипников, которые теперь будут влиять на величину номинального ресурса подшипников. В любом случае, SKF гарантирует, что любые изменения эксплуатационных характеристик подшипников будут подкреплены должным образом проведёнными ресурсными испытаниями.

### Преимущества новой обобщённой модели для клиентов

Внедрение модели GBLM даёт значительные преимущества для клиентов SKF. В частности, расчёт характеристик износостойкости теперь будет подкрепляться информацией о рисках повреждения поверхности в конкретных условиях применения. В том случае, когда условия эксплуатации подшипника сопряжены со значительным риском повреждения поверхности, мож-

но выполнить соответствующие корректирующие действия и рассчитать их влияние на величину риска повреждения поверхности. Иными словами, обобщённая модель для расчёта ресурса подшипников может стать средством диагностики и использоваться для повышения эксплуатационных характеристик подшипников за счёт снижения количества потенциальных неисправностей и отказов.

В целом, высокий риск повреждения поверхности вследствие неправильного смазывания или высокого уровня загрязнения нельзя устранить только за счёт использования подшипников увеличенной номинальной динамической грузоподъёмности или большего размера. В этом можно легко убедиться на примере влияния увеличенной номинальной нагрузки и размеров подшипника на нормализованную величину риска повреждения поверхности. Таким образом, преимущества для клиентов SKF от использования обобщённой



**Выставка Hannover Messe, апрель 2015 г. Гильермо Э. Моралес-Эспехель представляет новую модель SKF для расчёта ресурса подшипников.**

модели GBLM сводятся к наиболее оптимальному выбору подшипника, сопряжённых деталей и системы смазывания для максимально возможного увеличения работоспособности и сокращения общих эксплуатационных расходов.

### Выводы

Представленная обобщённая модель SKF для расчёта ресурса подшипников предлагает более гибкий способ выражения ресурса подшипников за счёт разделения условий, относящихся к поверхностным разрушениям, и общих подповерхностных характеристик усталости зон контактов качения. Данная модель включает возможность использования КПД и позволяет задавать конкретные характеристики подшипников, а также анализировать более специализированные конструкции и условия применения. Помимо оценки номинального ресурса подшипников, модель также позволяет вычислять величину нормализованного риска повреждения поверхности  $S_R$  для точного определения величины поверхностной усталости по сравнению с подповерхностной.

В целом, можно сделать следующие выводы:

1. Обобщённая модель SKF для расчёта ресурса подшипников является новой моделью, в которой разделяются условия, влияющие на поверхностную область, и условия, влияющие

на подповерхностную область, что обеспечивает более гибкий подход к оценке ресурса подшипников SKF.

2. Данная модель на настоящий момент является единственной моделью для расчёта ресурса подшипников, которая обеспечивает разделение поверхностных и подповерхностных условий с использованием формул, а также возможность интеграции знаний, полученных с использованием передовых численных трибологических моделей.
3. Новым элементом модели являются коэффициенты полезного действия, используемые для учёта конкретных запатентованных SKF усовершенствованных конструкций подшипников и/или конструктивных особенностей, влияющих на характеристики подшипников в заданных условиях эксплуатации.

4. Модель GBLM может рассматриваться в качестве платформы для моделей, которые будут разрабатываться по мере получения новых знаний, с возможностью интеграции новых данных с учётом различных явлений, влияющих непосредственно на поверхностные или подповерхностные зоны подшипников.
5. Обобщённая модель SKF для расчёта ресурса подшипников станет доступна для клиентов в ближайшее время. ●

### Авторы:

**Гильермо Э. Моралес-Эспехель**,  
главный научный сотрудник  
Научно-технического центра SKF,  
Ньювегейн, Нидерланды

### Антонио Габелли,

старший научный сотрудник  
Научно-технического центра SKF,  
Ньювегейн, Нидерланды

## Библиография

- [1] Gläntz W., *Contamination in Lubrication Systems for Bearings in Industrial Gear Boxes*, Ball Bearing Journal, 242, pp. 20-26, 1993.
- [2] Morales-Espejel, G.E., Gabelli, A., Ioannides, E., *Micro-geometry Lubrication and Life Ratings of Rolling Bearings*, Proc. IMechE, Part C, J. of Mech. Eng. Sci., vol. 224, pp. 2610-2626, 2010.
- [3] Gabelli, A., Morales-Espejel, G.E., Ioannides, E., *Particle Damage in Hertzian Contacts and Life Ratings of Rolling Bearings*, Trib. Trans., 51, pp. 428-445, 2008.
- [4] Morales-Espejel, G.E., Gabelli, A., Ioannides, E., *Micro-Geometry Lubrication and Life Ratings of Rolling Bearings*, Proc. IMechE, 224, Part C: J. of Mech. Eng. Sci., pp. 2610-2626, 2010.
- [5] Morales-Espejel, G.E., Brizmer, V., *Micropitting Modelling in Rolling-Sliding Contacts: Application to Rolling Bearings*, Trib. Trans., 54, pp. 625-643, 2011.
- [6] Morales-Espejel, G.E., Gabelli, A., *The Behaviour of Indentation Marks in Rolling-Sliding Elastohydrodynamically Lubricated Contacts*, Trib. Trans. 54, pp. 589-606, 2011.
- [7] Brizmer, V., Pasaribu, H.R., Morales-Espejel, G.E., *Micropitting Performance of Oil Additives in Lubricated Rolling Contacts*, Trib. Trans., 56, pp. 739-748, 2013.
- [8] Morales-Espejel, G.E., Gabelli, A., *The Progression of Surface Rolling Contact Fatigue*

*Damage of Rolling Bearings with Artificial Dents*, Trib. Trans. 58, pp. 418-431, 2015.

- [9] Morales-Espejel, G.E., Gabelli, A., de Vries, A., *A Model for Rolling Bearing Life with Surface and Subsurface Survival - Tribological Effects*, Tribology Transactions, Volume 58, Issue 5, 2015.
- [10] Lundberg, G., Palmgren, A., *Dynamic Capacity of Rolling Bearings*, Acta Polytechnica, Mec. Eng. Ser., 1(3), pp. 1-52, 1947.
- [11] Gabelli, A., Doyer, A-L, Morales-Espejel, G.E., *The Modified Life Rating of Rolling Bearings - A Criterion for Gearbox Design and Reliability Optimization*, AGM A Technical paper 14FTM16, ISBN: 978-1-61481-108-4, 2014.
- [12] Blachère, S. and Gabelli, A. *Monte Carlo Comparison of Weibull Two and Three Parameters in the Context of the Statistical Analysis of Rolling Bearings Fatigue Testing*, STP 1548, J. Beswick, Ed., pp. 126, STP104519, ASTM Int., West Conshohocken, PA 2012.
- [13] Weibull, W., *A Statistical Theory of Strength of Materials*, IVA Handlingar No. 151, Proc. Roy. Swed. Acad. of Eng. Sci., pp. 1-45, 1939.
- [14] Ioannides, E., Harris, T.A., *A New Life Model for Rolling Bearings*, ASME, J. of Trib., vol. 107, pp. 367-378, 1985.