

ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОГРАММ ФИРМЫ MSC ДЛЯ РАСЧЕТА ДИНАМИКИ И ПРОЧНОСТИ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ

Б.В.Рыжик
Санкт-Петербург, АО “Электросила”

1. Введение

Требования, предъявляемые к надежности и эксплуатационным характеристикам турбогенераторов, устанавливаемых на тепловых и атомных электростанциях, чрезвычайно высоки. Номинальный срок службы проектируемых в настоящее время турбогенераторов составляет 40 лет. Турбогенератор должен выдерживать без повреждения возможные аварийные режимы. Жесткие ограничения налагаются на уровень вибрации и шума. При этом турбогенератор является высоконагруженной машиной, подвергающейся воздействию целого комплекса нагрузок различной природы, вызывающих значительные механические напряжения.

Обеспечение надежной работы турбогенераторов в течение столь длительного срока достигается за счет тщательного и подробного анализа динамики и прочности всех узлов и деталей с использованием современных методов расчета. В частности многие механические задачи могут быть эффективно и надежно решены с помощью программных продуктов, предоставляемых фирмой MSC.Software. Использование конечно-элементного моделирования позволяет получить подробную картину напряженного состояния различных деталей, оценить их динамические свойства, проанализировать влияние концентраторов напряжений. Во многих случаях четкое представление о характере напряженного состояния подсказывает пути улучшения конструкции.

В данной работе обобщается опыт использования программ фирмы MSC – PATRAN, NASTRAN, Advanced FEA при исследовании динамики и прочности турбогенераторов. Рассматривается постановка задач, подходы к их решению, приводятся примеры результатов расчета.

2. Расчет узлов и деталей ротора

При расчете деталей ротора конечно-элементные программы использовались в основном для анализа прочности и усталости. Вращающийся ротор испытывает воздействие целого комплекса нагрузок, включающих центробежные силы, контактное давление в насаженных деталях, изгибающий момент от действия собственного веса, крутящий момент, вызываемый электромагнитными силами. Эти нагрузки создают как постоянные, так и переменные во времени напряжения с различной частотой изменения. Механические расчеты должны включать анализ прочности, малоциклового и высокоциклового усталости.

2.1 Расчет на прочность и малоцикловую усталость от действия центробежных и контактных сил

При вращении на ротор и его детали действуют центробежные силы, создающие значительные растягивающие напряжения. Уровень этих напряжений в некоторых частях ротора весьма высок, особенно в зонах с большими диаметрами и наличием концентраторов, таких как пазы, канавки, отверстия.

Ротор турбогенератора содержит ряд насаженных деталей – бандажных и контактных колец, вентиляторов, полумуфт. Контактное давление в зонах посадки создает сжимающие напряжения в валу и растягивающие – в деталях. Контактное давление максимально, когда ротор покоится. При вращении центробежные силы частично снимают давление посадки.

Когда ротор вращается с постоянной частотой, комбинация центробежных и контактных нагрузок создает постоянные во времени напряжения. При пусках и остановках они изменяются с изменением частоты вращения. Расчет на прочность должен включать анализ постоянного напряженного состояния при покое и вращении с максимальной частотой и оценку малоциклового усталости при пусках-остановах генератора.

Расчет напряженного и деформированного состояния в данном случае представляет собой решение достаточно сложной нелинейной контактной

задачи. Программа для нелинейного анализа фирмы MSC - Advanced FEA - оказалась весьма эффективной при ее решении.

Примеры результатов расчета для активной части ротора, бандажного кольца и вентилятора представлены на рис.1,2,3. В большинстве случаев достаточно было получить решение в двухмерной постановке – плоской для активной части ротора, осесимметричной для кольцевых насаженных деталей. Для более сложных деталей, таких как вентиляторы, приходилось решать задачу в полной трехмерной постановке.

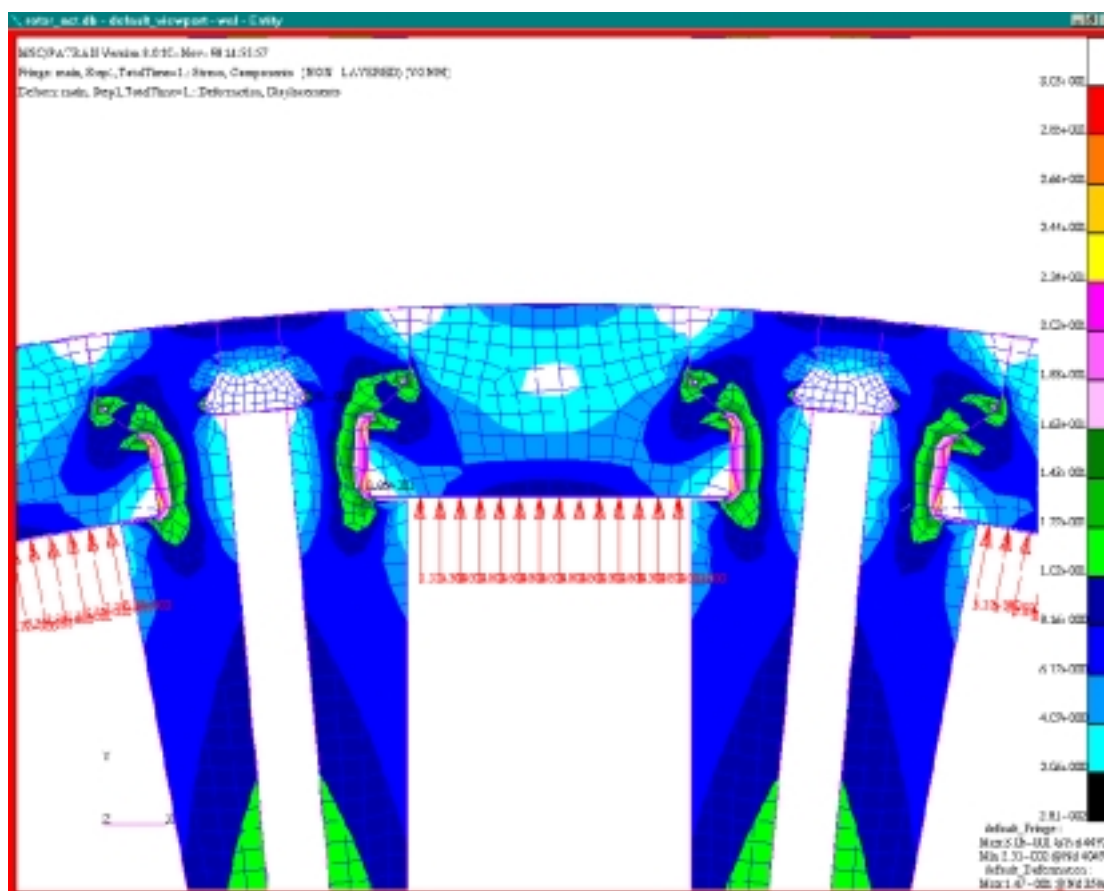


Рис.1. Результаты расчета напряжений в активной части ротора

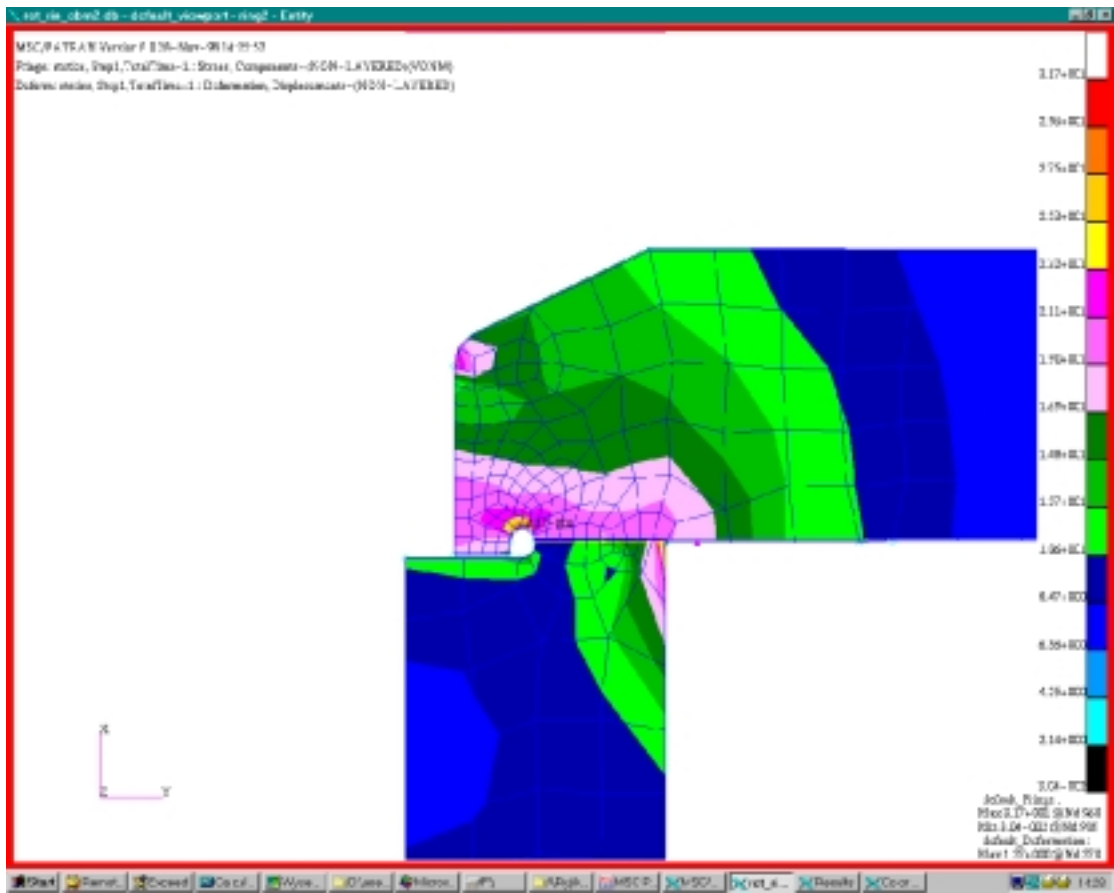


Рис.2. Результаты расчета напряжений в зоне контакта бандажное-центрирующее кольцо

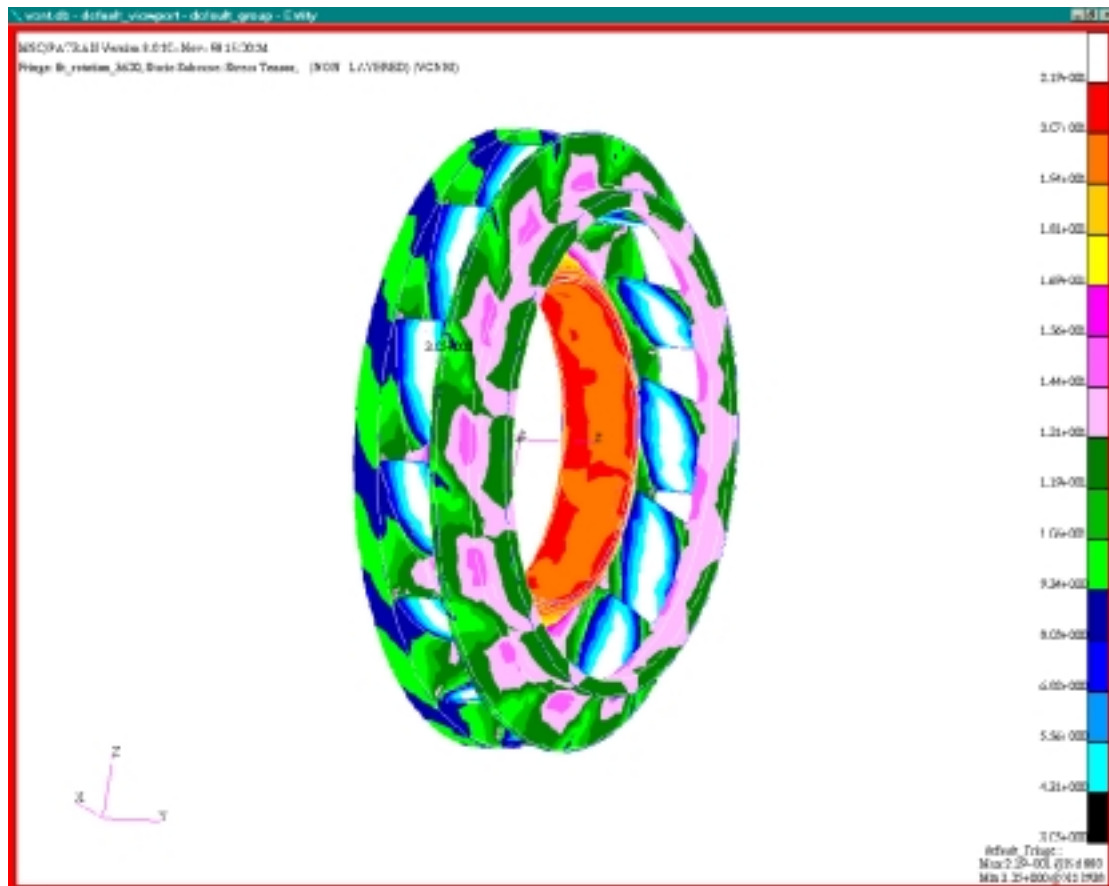


Рис.3. Результаты расчета напряжений в центробежном вентиляторе

2.2. Расчет усталостной прочности, связанной с прогибом под действием весовой нагрузки.

Ротор турбогенератора устанавливается горизонтально и под действием собственного веса изгибается в вертикальной плоскости. При вращении вокруг изогнутой оси в валу возникают знакопеременные напряжения с частотой, в два раза превышающей частоту вращения. Уровень этих напряжений в наиболее нагруженных сечениях является одним из критических параметров с точки зрения механики, поскольку именно он определяет усталостную прочность и ресурс вала.

Оценка усталостной прочности проводится на основе расчета напряженного состояния в основных сечениях ротора. При проведении расчета очень важно точно учесть влияние различных концентраторов напряжений – отверстий, скруглений в местах изменения диаметра, канавок и т.п. В тех случаях, когда в какой-то области сосредоточено несколько концентраторов,

оценить их совокупное влияние на напряженное состояние достаточно сложно. В таких ситуациях применение конечно-элементного моделирования оказывает неоценимую помощь.

Расчет напряженного состояния при изгибе проводился с помощью программы NASTRAN в трехмерной постановке. Рис.4 иллюстрирует результаты расчета для сечения с отверстием в зоне изменения диаметра.

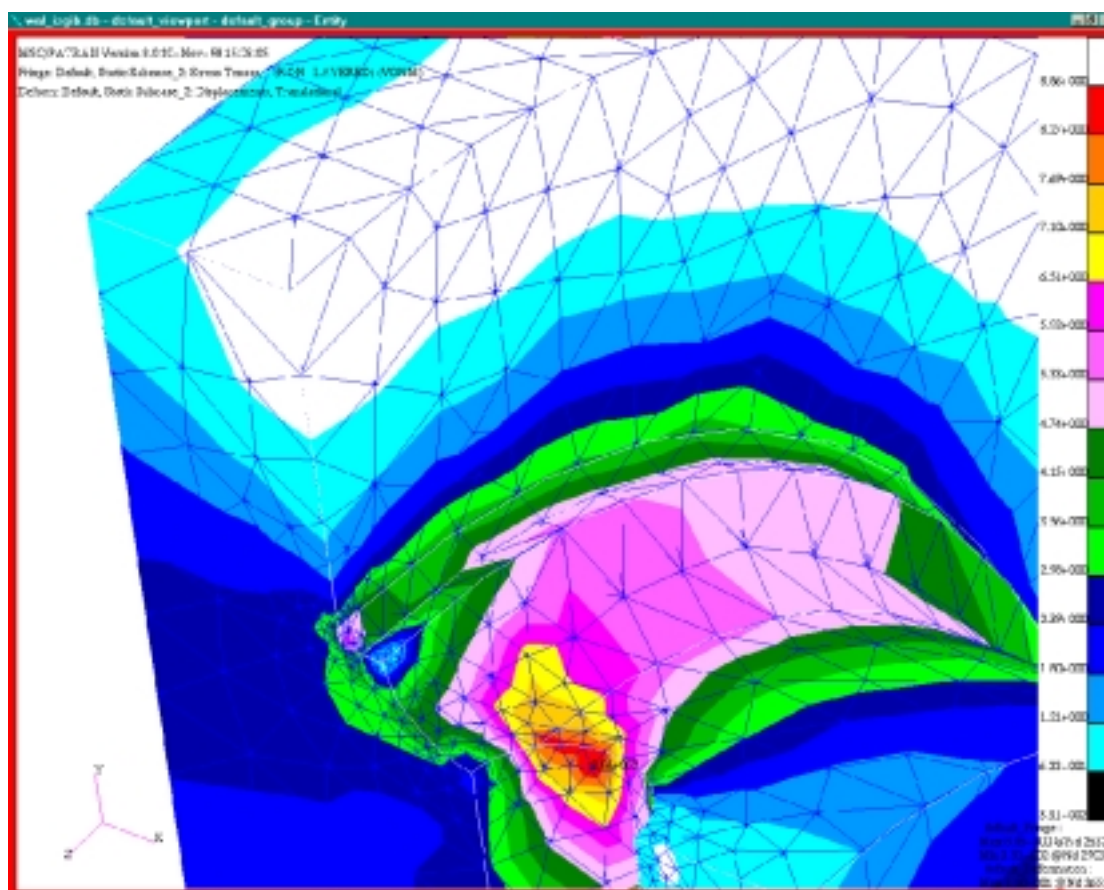


Рис.4. Результаты расчета напряжений в галтели с отверстием при изгибе ротора под действием собственного веса

2.3 Расчет на прочность и малоцикловую усталость при крутильных колебаниях

Скачки и колебания электромагнитного момента в аномальных и переходных режимах, таких как несинхронное включение, качания в сети, внезапные сбросы нагрузки, короткие замыкания, вызывают крутильные колебания валопровода. Механический скручивающий момент в некоторых сечениях ротора при крутильных колебаниях может в несколько раз превышать

номинальное значение. Хотя крутильные колебания возникают достаточно редко и их продолжительность невелика, они могут существенно влиять на усталостную и даже кратковременную прочность ротора.

Исследование прочности валопровода при крутильных колебаниях является важной составной частью механических расчетов. Оно включает в себя анализ электромагнитных переходных процессов, моделирование возникающих крутильных колебаний и оценку напряжений в наиболее «опасных» сечениях.

При расчете напряжений, обусловленных действием крутящего момента, также как и в случае анализа изгиба ротора, очень важно правильно учесть влияние концентраторов. Конечно-элементное моделирование существенно облегчает решение этой задачи. На рис.5 представлены результаты расчета напряжений под действием крутящего момента на участке вала с двумя отверстиями, полученное с помощью программы NASTRAN в трехмерной постановке.

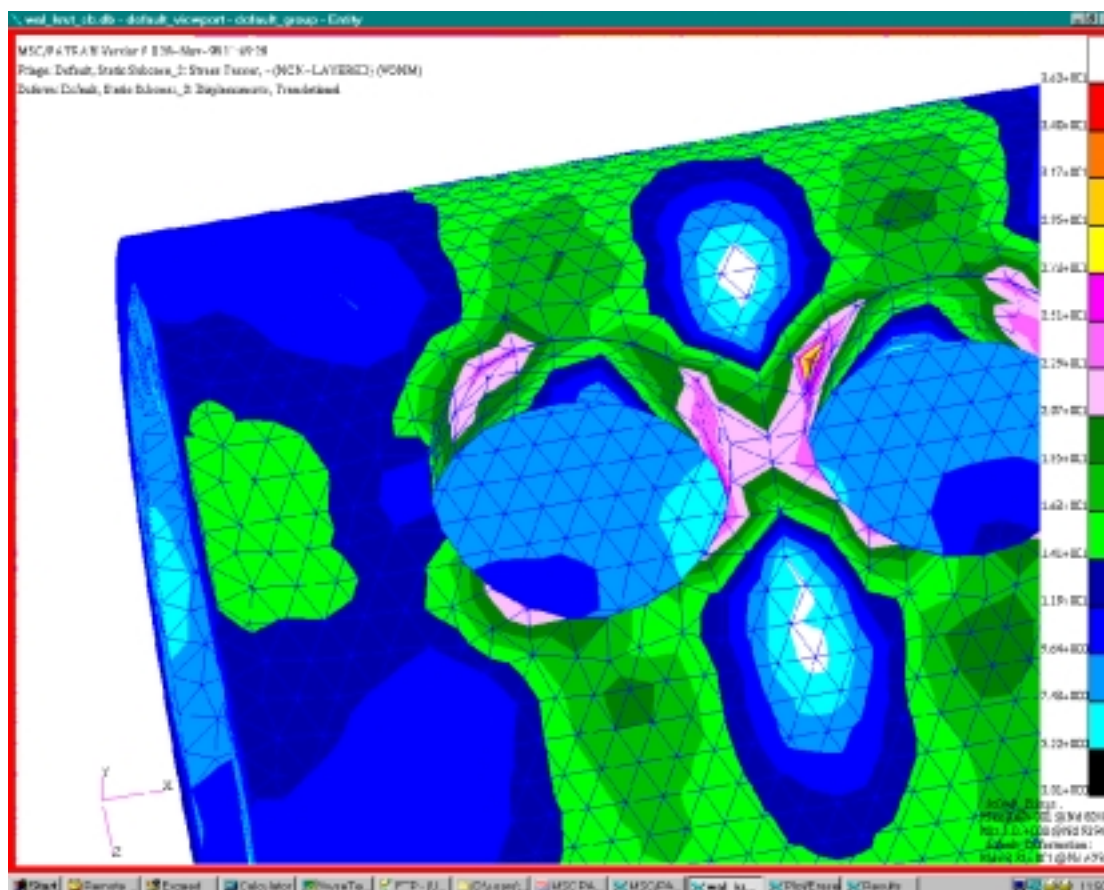


Рис.5. Результаты расчета напряжений на участке с двумя отверстиями при действии крутящего момента

3. Расчет узлов и деталей статора

При расчете элементов статора конечно-элементные программы использовались в основном для анализа динамических параметров – собственных частот и форм наиболее сложных деталей. В частности, рассчитывались совместные собственные частоты колебаний сердечника, подвески и элементов крепления, собственные частоты и формы колебаний щитов и т.п.

3.1. Расчет собственных частот и форм колебаний сердечника и элементов крепления

Программа NASTRAN оказалась весьма эффективным инструментом для расчета собственных частот такой сложной конструкции, как система сердечник, подвеска, элементы крепления. Учитывая сложность конструкции, включающей большое число деталей, при проведении расчета в схему вносились разумные упрощения – плоские протяженные детали заменялись пластинчатыми элементами, ребра подвески – балочными элементами с эквивалентными параметрами, полученными в результате детального расчета в трехмерной постановке. Сердечник моделировался, как цилиндрическая оболочка с эквивалентными упругими и инерционными характеристиками.

Пример результатов расчета представлен на рис.6. Расчетные величины вполне удовлетворительно совпали с имеющимися экспериментальными данными.

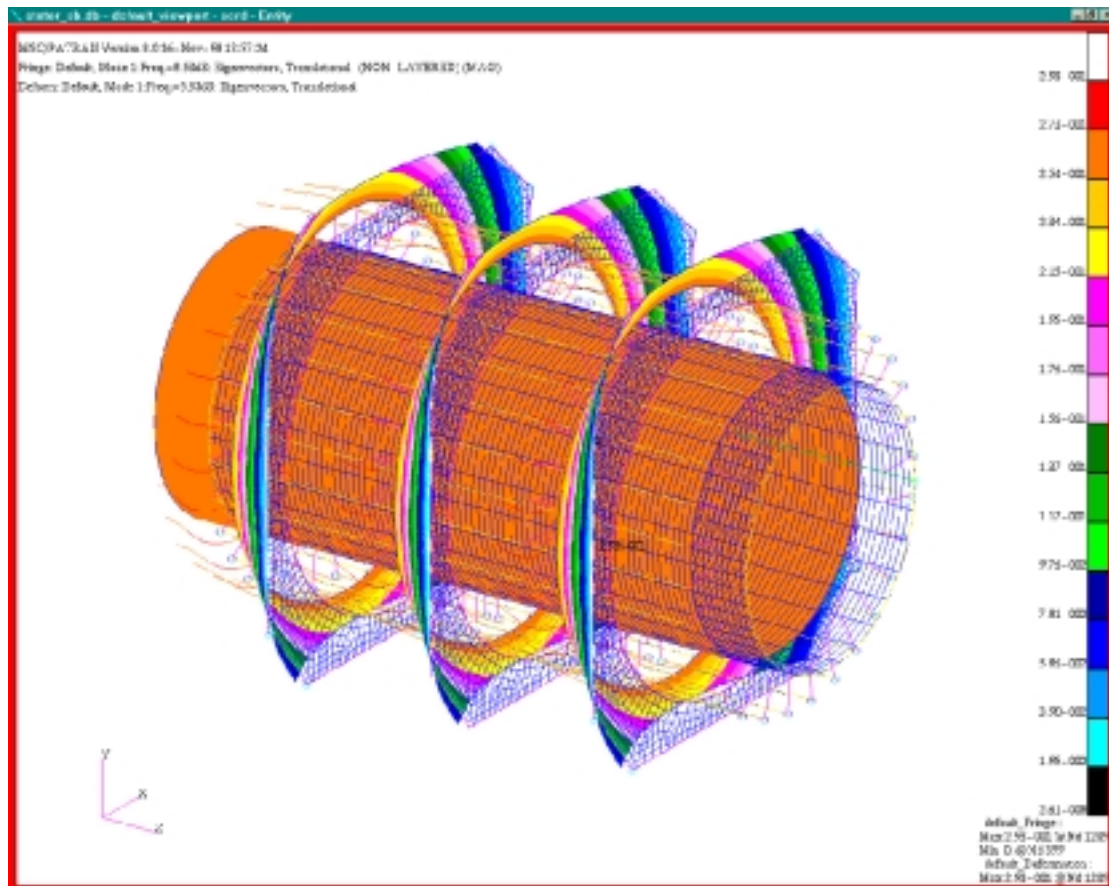


Рис.6. Первая собственная форма колебаний системы сердечник – подвеска -
стенки

3.2. Расчет собственных частот и форм щитов

Еще одним узлом статора, собственные частоты и формы которого определялись с помощью программы NASTRAN, является торцевой щит. Эта деталь имеет достаточно сложную форму и определение ее динамических свойств другими способами является большой проблемой.

Пример результатов расчета представлен на рис.7. При расчете плоские детали щита рассматривались, как двухмерные элементы типа 'shell'.

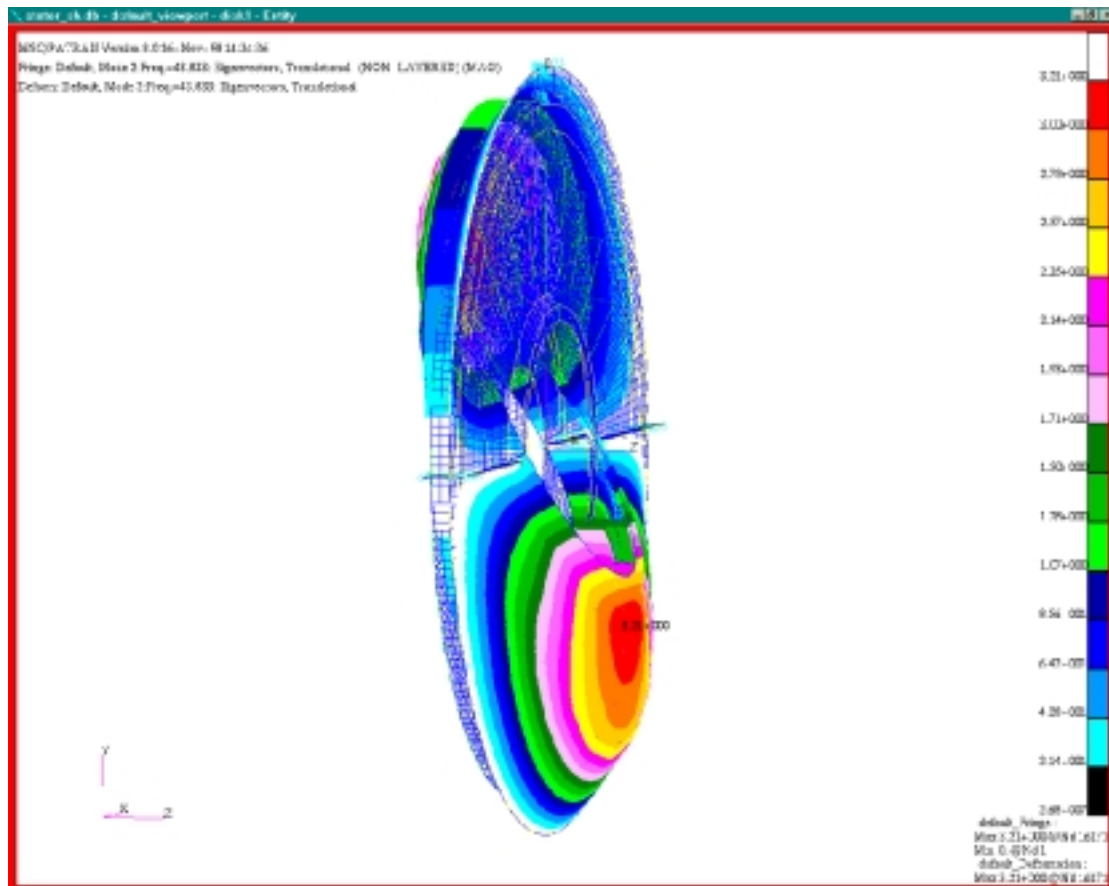


Рис.7. Вторая форма свободных колебаний торцевого щита

Заключение

Использование программ фирмы MSC.Software – PATRAN, NASTRAN, Advanced FEA – дает возможность эффективно получить решение многих задач динамики и прочности турбогенераторов. В частности, с помощью этих программ удастся построить картину распределения напряжений в таких сложных узлах, как активная часть ротора, бандажные кольца, вентиляторы, другие детали, имеющие концентраторы напряжений. Используя программу NASTRAN, можно рассчитать собственные частоты и формы колебаний различных узлов статора, включая систему сердечник – подвеска - элементы крепления, торцевые щиты. В целом можно сказать, что внедрение программ фирмы MSC.Software позволяет повысить качество и расширить возможности проведения механических расчетов турбогенератора.