

ПРОЧНОСТЬ МАГНИТА И БАНДАЖА РОТОРА ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА НА ПОСТОЯННЫХ МАГНИТАХ

Зотов С.Н.

Среди высокоскоростных турбомашин (турбокомпрессоров и турбодетандеров) с частотами вращения ротора от 20 до 200 тыс.об/мин имеется еще целый класс машин с электроприводом. Речь идет в первую очередь об электрокомпрессорах и турбогенераторах. Как правило, все высокоскоростные турбомашины имеют подшипниковые узлы специальной конструкции – это либо магнитные подшипники, либо газостатические подшипники, либо газодинамические. Все перечисленные подшипники бесконтактные, т.е. в процессе эксплуатации вращающийся ротор и неподвижный статор непосредственно не соприкасаются.

Высокоскоростные электроприводы могут иметь различные конструкции, однако, наиболее перспективными принято считать электроприводы с роторами на постоянных магнитах (ПМ) – это так называемые вентильные или синхронные электроприводы. Но даже среди вариантов конструкций роторов указанных приводов также имеется некоторое разнообразие: с бандажом из композита с кевларовой тканью, или с бандажом оригинальной конструкции из титановой ленты, или с цельнометаллическим бандажом, возможны и другие варианты.

В данной статье проведен анализ напряжений, возникающих в магните и бандаже ротора конкретной конструкции – с ЦЕЛЬНОМЕТАЛЛИЧЕСКИМ БАНДАЖОМ. Как известно, мощность электромашины с ротором на ПМ зависит от объема магнита. Поэтому при небольших мощностях электропривода (примерно до 15 кВт) целесообразно применять сплошной магнит, так сказать, «одним куском». С увеличением мощности растет габарит магнита и приходится в центре вала размещать магнитопровод из магнитомягкой стали.

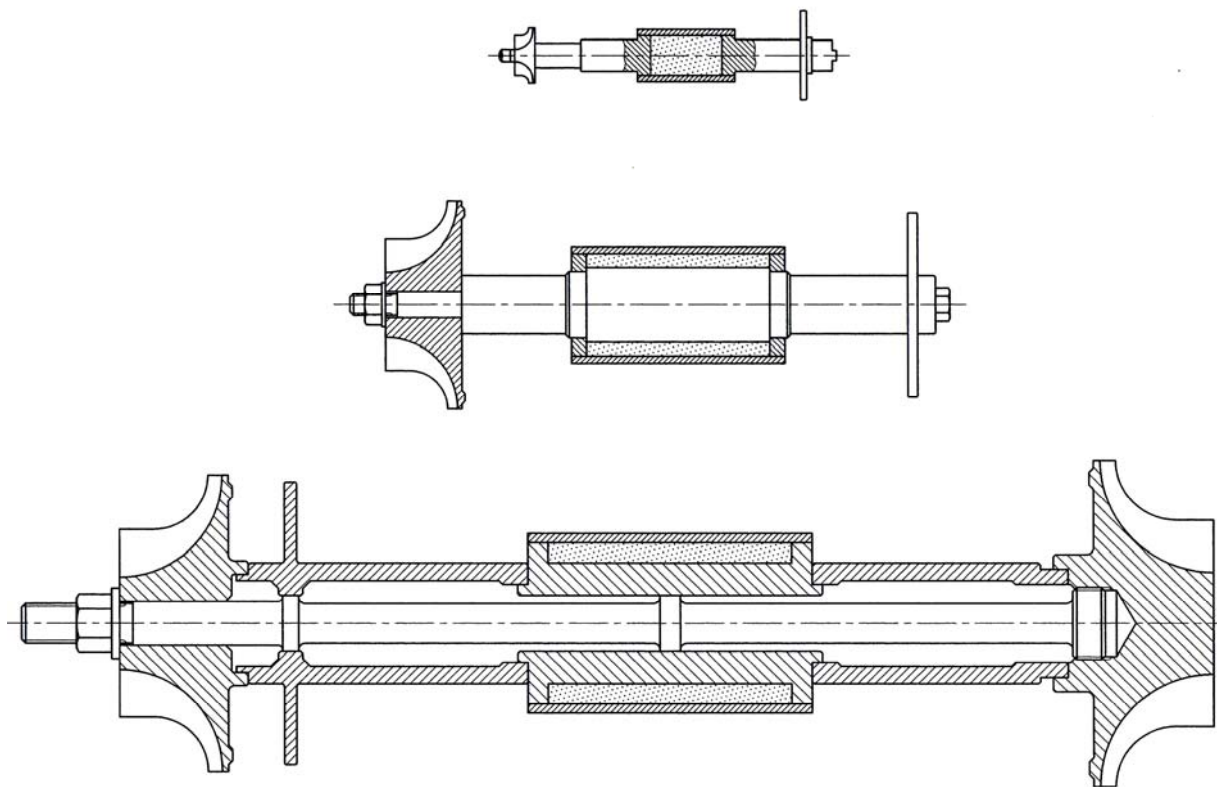


Рис. 1. Конструкции роторов с постоянными редкоземельными магнитами с цельнометаллическим бандажом, пояснения в тексте.

При мощности электропривода от 15 кВт до 50 кВт магнитопривод может быть без центрального отверстия. При бóльшей мощности (более 50 кВт) габариты таковы, что ротор приходится выполнять составным с центральной стяжкой, в этом случае в магнитоприводе сделано центральное отверстие, см. рис. 1.

Для роторов высокоскоростных электроприводов более всего подходит высокоэффективный редкоземельный самарий-кобальтовый магнит (SmCo). У этого магнита высокая точка Кюри, около 800 °С, что позволяет создать ротор, способный работать до температуры 250 °С. У редкоземельного магнита типа неодим-железо-бор (Ne-Fe-B) относительно невысокая точка Кюри (250-300 °С), а другие типы магнитов обладают не достаточно высокой эффективностью.

Анализируя прочностные характеристики самарий-кобальтовых магнитов (марок КС-25 и КС-37) можно отметить, что они обладают очень высоким пределом прочности «на сжатие», однако «на растяжение» прочность более чем на порядок ниже !

Подобные характеристики и предопределили оптимальную конструкцию ротора : на магнит следует надеть бандаж, причем с большим натягом ! Натяг бандажа обеспечивает необходимое сжатие магнита. При увеличении частоты вращения ротора бандаж из-за центробежных сил «раскрывается» и сжимающие напряжения в магните уменьшаются. Величину натяга нужно выбрать с таким расчетом, чтобы на максимальных частотах вращения ротора в магните по-прежнему оставалось бы небольшое сжатие, главное – нельзя допустить растяжения в магните. Чтобы не было замыкания магнитного потока бандаж должен быть изготовлен из немагнитного материала !

На фирме «МЕХТУРБО» были составлены компьютерные программы, позволяющие рассчитать напряжения в магните и бандаже. При составлении расчетной методики был использован справочник, см. [1] . В расчетной программе учитываются следующие факторы : геометрические размеры магнита и бандажа, характеристики материалов (плотности, модули упругости, коэффициенты Пуассона, коэффициенты линейного расширения), величина натяга бандажа, частота вращения ротора, а также напряжения от температурных деформаций.

При проведении научно-исследовательской работы по созданию экспериментальной «Установки для утилизации сбросного тепла, работающей по органическому циклу Ренкина (ORC)», был спроектирован высокоскоростной фреоновый турбогенератор ТГ-1 на лепестковых газодинамических подшипниках, содержащий турбинную ступень и электрогенератор вентильного типа с ротором на постоянных магнитах. В конструкции ротора использован магнит марки КС-25 и бандаж из сплава 36НХТЮ.

Расчетные параметры турбогенератора : номинальная мощность 1 кВт, частота вращения ротора 100 тыс.об/мин, расчетная температура внутри корпуса генератора 180 °С. Была принята следующая конструкция ротора : без центрального отверстия со сплошным магнитом, диаметр магнита $D_M=17$ мм, наружный диаметр бандажа $D_B=21,5$ мм. Толщина бандажа составила $\delta=2,25$ мм.

У вращающегося диска максимальные растягивающие напряжения возникают в центре, поэтому были рассчитаны напряжения в центре магнита и на среднем радиусе бандажа для разных значений натяга бандажа. На рис. 2 представлены графические иллюстрации решения «холодной задачи» для магнита ротора. В таблице № 1 представлены численные результаты расчетов. Для каждого натяга Δ (30 мкм, 40 мкм, 50 мкм и 60 мкм) отдельно приведены : контактное давление на стыке бандажа (P), радиальное напряжение в центре магнита (σ_M) и напряжение в центре бандажа (σ_B). Все результаты представлены в [МПа]. Следует отметить, что отрицательные значения напряжений соответствуют сжатию, положительные значения – растяжению.

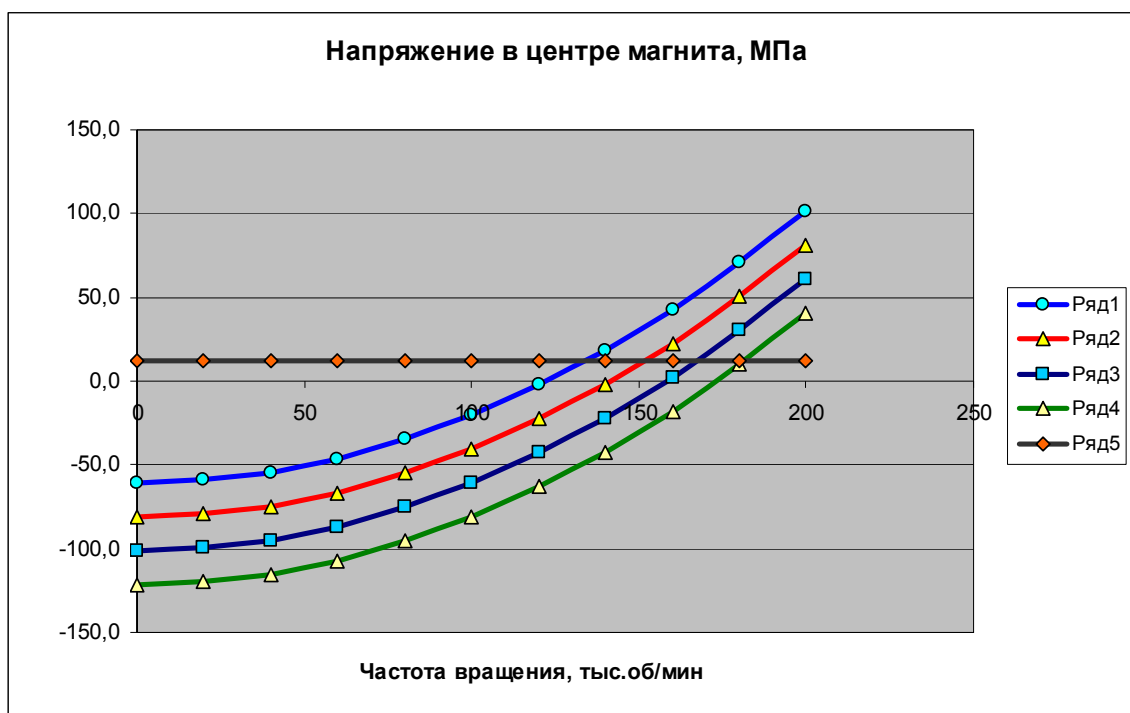


Рис. 2. Напряжения в центре магнита ротора турбогенератора ТГ-1 без учета нагрева, ряд 1 – натяг бандажа $\Delta=30$ мкм, ряд 2 – 40 мкм, ряд 3 – 50 мкм, ряд 4 – 60 мкм, ряд 5 – допустимое напряжение растяжения магнита.

Таблица № 1

N, тыс.об/мин		0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
Ряд 1	P	-61	-60	-59	-56	-52	-47	-41	-35	-26	-17	-7
	σ_M	-61	-59	-54	-46	-35	-20	-2	19	43	71	101
	σ_B	229	231	235	241	250	262	276	293	312	335	360
Ряд 2	P	-81	-81	-79	-76	-73	-68	-62	-55	-47	-38	-27
	σ_M	-81	-79	-75	-66	-55	-41	-23	-2	23	50	81
	σ_B	306	307	311	317	326	338	352	369	389	411	436
Ряд 3	P	-101	-101	-99	-97	-93	-88	-82	-75	-67	-58	-48
	σ_M	-101	-100	-95	-87	-75	-61	-43	-22	2	30	61
	σ_B	382	384	387	394	403	414	429	445	465	487	512
Ряд 4	P	-122	-121	-119	-117	-113	-108	-102	-95	-87	-78	-68
	σ_M	-122	-120	-115	-107	-96	-81	-63	-42	-18	10	41
	σ_B	459	460	464	470	479	491	505	522	541	563	588

Ряд 5 на рис. 4 представляет собой допустимое напряжение растяжения магнита при коэффициенте запаса, равном $k=3$, т.е. $[\sigma_M]=35/3 \approx 12$ МПа. Однако, магнит очень «капризный» материал и при наличии микротрещин разрушение может начаться сразу же при «переходе» через нуль, т.е. как только напряжение перейдет из сжатия в растяжение. Поэтому в дальнейшем оценку прочности магнита будем производить по моменту нулевого напряжения.

Анализ результатов показывает, что при натяге 30 мкм частота вращения перехода сжатия в растяжение в центре магнита произойдет на скорости 122 тыс.об/мин, при натяге 40 мкм – при скорости 141 тыс.об/мин, при натяге 50 мкм – при скорости 158 тыс.об/мин, при натяге 60 мкм – при скорости 173 тыс.об/мин.

В результате предварительного расчета был выбран натяг бандажа $\Delta=50$ мкм. При расчетной частоте вращения 100 тыс.об/мин напряжение в центре бандажа составляет $\sigma_B=414$ МПа. Коэффициент запаса по бандажу без учета нагрева составляет :

$$k_B = \frac{\sigma_T}{\sigma_B} = \frac{700}{414} \approx 1,7 \quad (1)$$

Коэффициент запаса по разрушению магнита рассчитывается по частоте вращения, при которой происходит переход магнита из состояния сжатия в растяжение :

$$k_M = \frac{\omega_0}{\omega_p} = \frac{N_0[\text{тыс.об} / \text{мин}]}{N_p[\text{тыс.об} / \text{мин}]} = \frac{158}{100} \approx 1,6 \quad (2)$$

Иногда подобные конструкции с бандажом принято рассчитывать по упрощенной методике «на раскрытие бандажа», которая содержит всего 3-4 формулы. Проведенные расчеты показали, что упрощенный расчет «на раскрытие» не совсем корректен для варианта с магнитом и бандажом, т.к. не учитывает напряжение в центре вала (в данном случае – магнита). К примеру, в сделанном выше расчете при натяге 30 мкм разрушение магнита может произойти на скорости 122 тыс.об/мин, а раскрытие бандажа (т.е. когда контактное давление от натяга бандажа P изменит знак с минуса на плюс) при том же натяге произойдет на скорости 210 тыс.об/мин ; при натяге 40 мкм разрушение магнита возможно на скорости 141 тыс.об/мин, а раскрытие бандажа – на скорости 245 тыс.об/мин ; и т.д.

Как уже было сказано ранее, магнит изначально находится в сжатом состоянии по причине натяга бандажа. При увеличении частоты вращения центробежные силы начинают «растягивать» бандаж, и сжимающая нагрузка на магнит уменьшается. Как ни парадоксально, но на рабочих частотах вращения у магнита получаются минимальные напряжения, главная задача – это не допустить растяжения в магните. Поэтому (для магнита) чем больше величина натяга, тем больше можно допустить частоту вращения ротора.

С точки зрения напряженного состояния бандажа ситуация противоположная. Бандаж даже без вращения уже находится под большим растягивающим напряжением, и чем больше величина натяга, тем больше напряжение. С увеличением частоты вращения ротора это растягивающее напряжение будет только увеличиваться ! В связи с этим для бандажа следует подбирать материалы, обладающие большой прочностью.

Если вернуться к предыдущему расчету, то можно увидеть зависимость предельной частоты вращения ротора (для магнита) от величины натяга бандажа : при натяге 30 мкм частота вращения перехода сжатия в растяжение в центре магнита произойдет на скорости 122 тыс.об/мин, при натяге 40 мкм – при скорости 141 тыс.об/мин, при натяге 50 мкм – при скорости 158 тыс.об/мин, при натяге 60 мкм – при скорости 173 тыс.об/мин. Эту характеристику можно представить как «Предельную скорость для магнита», см. «Ряд 1» на рис. 3.

Но чтобы иметь более полную «картину прочности» конструкции целесообразно данную характеристику дополнить еще «Предельной скоростью для бандажа». Например, предел текучести материала бандажа (сплав 36НХТЮ) составляет $\sigma_T=700$ МПа. Если принять коэффициент запаса равным, к примеру $k_B=1,5$, то допустимое напряжение бандажа составит $[\sigma_B]=(700/1,5)\approx 470$ МПа. Теперь нужно вернуться к предыдущему расчету и определить при каких именно частотах вращения в бандаже будут возникать напряжения равные 470 МПа (при натяге 30 мкм – это произойдет на скорости 270 тыс.об/мин, при натяге 40 мкм – 225 тыс.об/мин, при натяге 50 мкм – 165 тыс.об/мин и при натяге 60 мкм – 60 тыс.об/мин). Полученную характеристику («Ряд 2») следует отобразить на том же графике, см. рис. 3.

Таким образом, кривая «Ряд 2» определяет «рабочую область» для всей конструкции. Все скоростные режимы, которые соответствуют точкам правее этой кривой – не могут надежно работать (по причине чрезмерной нагрузки в бандаже) ! Например, при натяге 60 мкм магнит способен выдержать частоту вращения 173 тыс.об/мин (это самая правая точка на кривой «Ряд 1»), однако при этом режиме бандаж может начать разрушаться.

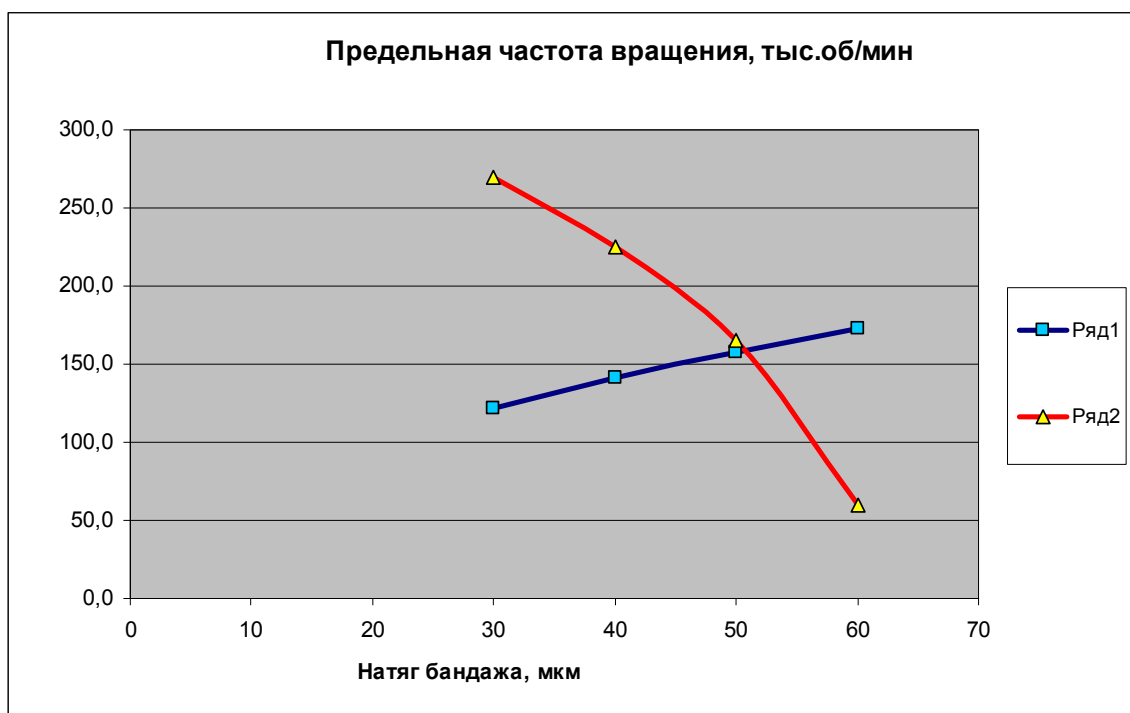


Рис. 3. Предельные частоты вращения без нагрева при толщине бандажа $\delta=2,25$ мм ; ряд 1 – частота перехода центра магнита в растяжение, ряд 2 – частота вращения, при которой напряжение в бандаже составляет $\sigma_B=470$ МПа.

Более того, точка пересечения этих двух кривых, по сути, характеризует оптимальную конструкцию, а точнее «равнопрочную». При этом натяге ($\Delta \approx 50$ мкм) и магнит и бандаж имеют примерно одинаковые коэффициенты запаса по прочности при расчетной частоте вращения, см. формулы (1) и (2).

Представленные на рис. 3 предельные частоты вращения – это данные только для конкретной конструкции с диаметром магнита $D_M=17$ мм и толщиной бандажа $\delta=2,25$ мм. Целесообразно рассчитать аналогичные параметры и для других толщин бандажа. Дело в том, что толщина бандажа определяет величину воздушного зазора магнитной цепи между магнитом и статором электропривода. Поэтому при проектировании изделия все полученные данные (о предельных скоростях при разных толщинах бандажа) следует согласовать с разработчиком электропривода.

На рис. 4 представлены напряжения в центре магнита при использовании бандажей из других материалов (при условии одинакового натяга $\Delta=50$ мкм). Частота вращения, при которой сжимающие напряжения в центре магнита перейдут в растягивающие, составит : 158 тыс.об/мин при использовании бандажа из сплава 36НХТЮ, 115 тыс.об/мин при использовании бандажа из латуни ЛС59-1 и 132 тыс.об/мин для титанового сплава ВТ1-1.

Лучшие характеристики из предложенных материалов обеспечивает сплав 36НХТЮ. Примерно такую же характеристику (для магнита) обеспечивает нержавеющая и немагнитная сталь 12Х18Н10Т (т.к. имеет аналогичный модуль упругости E и почти такую же плотность ρ), но у этой стали запас прочности меньше почти в три раза, а это значит, что (в данной конструкции) сталь 12Х18Н10Т не подходит по прочности бандажа.

Латунь ЛС59-1 (при аналогичном натяге и толщине бандажа) значительно уступает хром-никелевому сплаву 36НХТЮ, главным образом, по причине низкого модуля упругости E . И по прочности латунь значительно уступает сплаву 36НХТЮ.

Бандаж из титана также уменьшает сжимающее напряжение в магните и тоже по причине низкого модуля упругости по сравнению со сталью. Но обращает на себя внимание более пологий наклон характеристики (для напряжения в центре магнита) при использовании бандажа из титана – это можно объяснить низкой плотностью материала ($\rho=4500$ кг/м³).

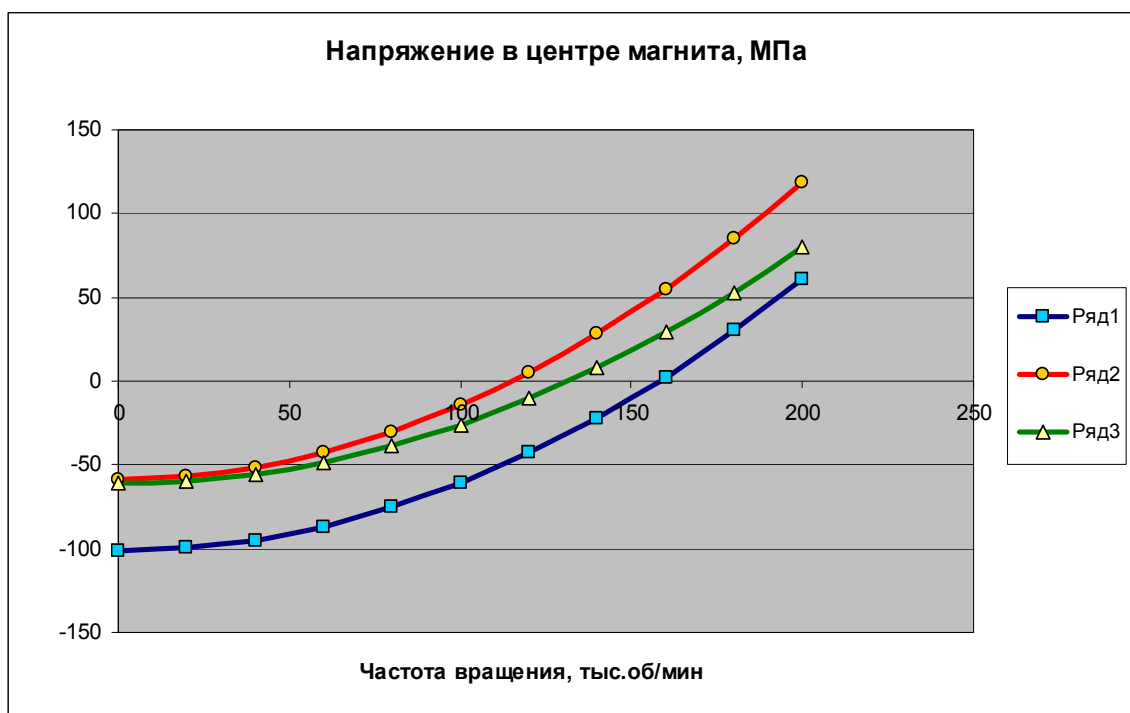


Рис. 4. Напряжения в центре магнита у роторов с разными бандажами, ряд 1 – сплав 36НХТЮ, ряд 2 – латунь, ряд 3 – титан.

Рассмотрим конструкцию с бандажом из титана более внимательно... Итак, при натяге $\Delta=50$ мкм частота вращения ротора, при которой напряжение в центре магнита переходит из сжатия в растяжение будет 158 тыс.об/мин с бандажом из сплава 36НХТЮ и 132 тыс.об/мин с бандажом из титана. Чтобы увеличить эту частоту с бандажом из титана следует увеличить натяг, а именно, при натяге $\Delta=72$ мкм с бандажом из титана скорость перехода в растяжение тоже будет 158 тыс.об/мин. Но при таком натяге напряжение в бандаже составит $\sigma_B=348$ МПа.

Одним из самых распространенных титановых сплавов является сплав ВТ1-1. Предел прочности у него значительно увеличивается с понижением температуры : при температуре -200°C $\sigma_T=1000$ МПа, при температуре 20°C $\sigma_T=400$ МПа, при температуре 300°C $\sigma_T=300$ МПа. С учетом того, что рабочая температура турбогенератора ТГ-1 составляет 180°C , при натяге $\Delta=72$ мкм напряжения в бандаже будут примерно равными пределу текучести сплава ВТ1-1, иными словами, не будет никакого запаса прочности !

Однако существуют жаропрочные титановые сплавы, обладающие повышенной прочностью при высоких температурах. Например, сплав ВТ6 имеет при температуре 300°C предел текучести $\sigma_T=460$ МПа. Таким образом, при использовании сплава ВТ6 и при натяге $\Delta=72$ мкм коэффициент запаса бандажа составит $k_B=(460/348)\approx 1,3$, а скорость перехода центра магнита в растяжение составит 158 тыс.об/мин (т.е. такая же как у сплава 36НХТЮ).

И все-таки бандаж из титана уступает хром-никелевому сплаву 36НХТЮ. Прежде всего потому что уменьшенный модуль упругости титана приходится компенсировать существенным увеличением натяга.

С учетом высокой точки Кюри у самарий-кобальтового магнита (800°C) применение хром-никелевого сплава 36НХТЮ позволяет создать конструкцию ротора на постоянных магнитах, способную работать при температурах до 250°C .

На рис. 5 приведены напряжения в центре магнита для конструкции со сплошным магнитом и на минимальном радиусе магнита для конструкций с магнитопроводом. В качестве эталона взята «холодная задача» ротора турбогенератора ТГ-1. Кривая «Ряд 1» – соответствует сплошному магниту с натягом $\Delta=50$ мкм, частота вращения перехода центра магнита в растяжение составляет 158 тыс.об/мин.

«Ряд 2» на графике соответствует конструкции с магнитопроводом без центрального отверстия. Т.к. во вращающемся диске максимальные растягивающие напряжения возникают в центре диска и по мере удаления к периферии диска эти напряжения уменьшаются, то в конструкции с магнитопроводом растягивающие напряжения на радиусе R_M всегда будут меньше, чем в центре диска. Именно по этой причине в конструкции с магнитопроводом можно уменьшить величину натяга бандажа. В частности, для этой конструкции был определен новый натяг бандажа ($\Delta=36$ мкм), при котором скорость перехода в растяжение на радиусе R_M будет соответствовать эталону, т.е. 158 тыс.об/мин.

Наконец, «Ряд 3» – это конструкция с магнитопроводом и центральным отверстием, диаметр отверстия был взят равным 50% от диаметра сопряжения магнитопровода с магнитом.

ПАРАМЕТРЫ		Ряд 1	Ряд 2	Ряд 3
Наружный диаметр магнита	D_2 , мм	17	17	17
Внутренний диаметр магнита	D_M , мм	0	11	11
Диаметр центрального отверстия	D_1 , мм	0	0	5,5
Натяг бандажа	Δ , мкм	50	36	36

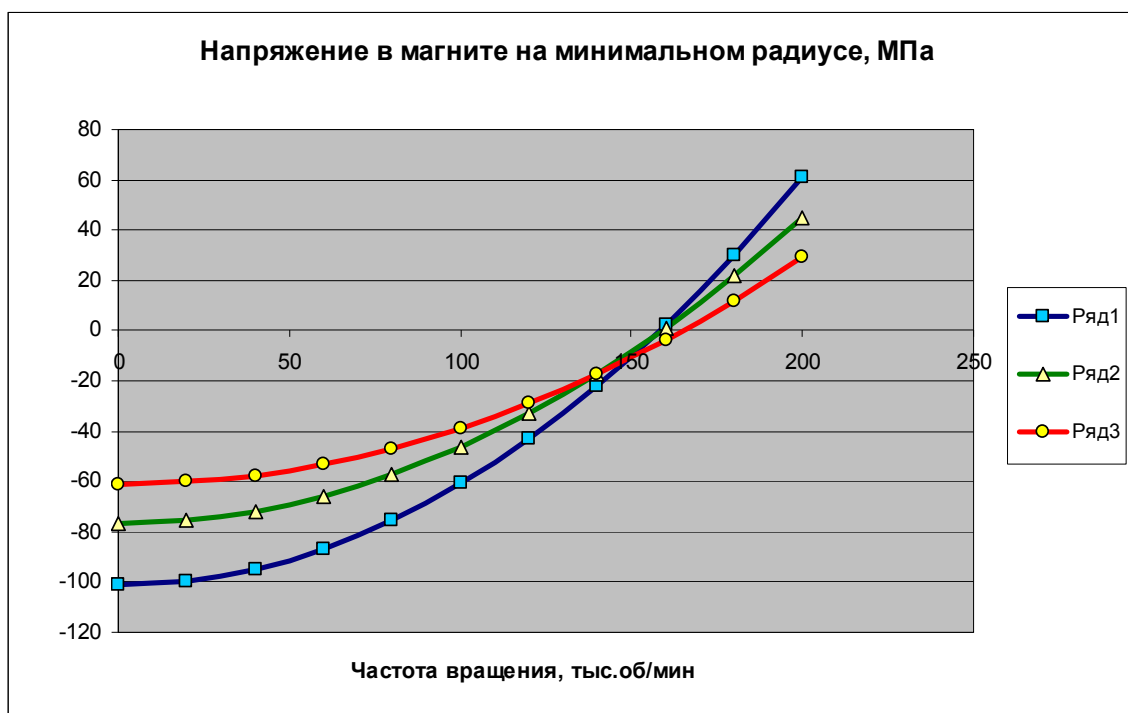


Рис. 5. Влияние магнитопровода на прочность.

Расчеты показали, что растягивающие напряжения на радиусе R_M уменьшаются, таким образом, применение магнитопровода позволяет уменьшить натяг бандажа. Центральное отверстие еще больше снижает эти напряжения, о чем свидетельствует уменьшение наклона кривой «3», скорость перехода магнита в растяжение при этом даже чуть возрастает (до 165 тыс.об/мин).

Расчеты с учетом нагрева показали, что при быстром нагреве периферии ротора на ПМ с бандажом при условии холодной центральной части магнита, происходит заметное снижение коэффициента запаса по прочности магнита. Поэтому следует рекомендовать при запуске из холодного состояния газовой турбины, ротор которой содержит постоянные магниты с бандажом, а на вход в турбину подается газ с высокой температурой, не сразу выходить на расчетные частоты вращения ротора. Сначала нужно установить обороты на уровне примерно 50% от номинальных, и сделать выдержку на режиме несколько минут.

И только после прогрева ходовой части турбомашины и установления стабильных температур, можно поднять частоту вращения ротора до расчетной.

Известно также, что в равномерно нагретом диске тепловые деформации отсутствуют, но только при условии одинаковых коэффициентов линейного расширения по всему диску. На рис. 6 представлены с учетом реальных коэффициентов линейного расширения магнита КС-25 и сплава 36НХТЮ графические иллюстрации «горячей задачи» турбогенератора ТГ-1 (ряд 2), а в таблице № 2 – точные значения контактного давления и напряжений в центре магнита и в бандаже в [МПа] .

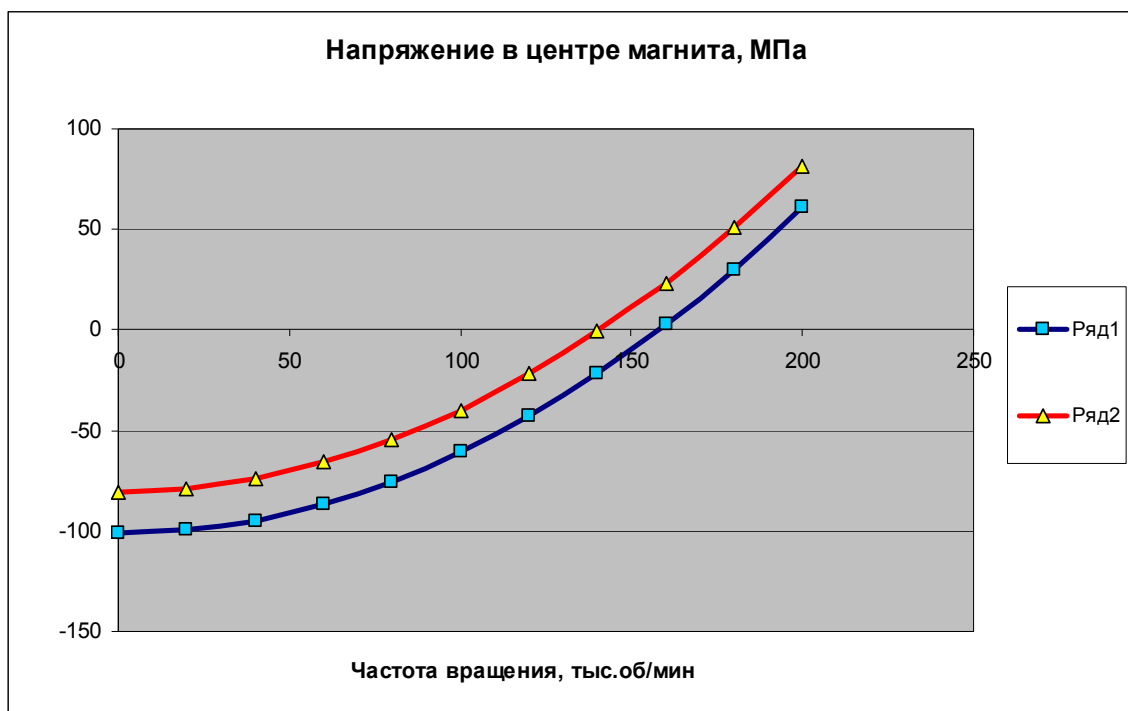


Рис. 6. Влияние нагрева ротора турбогенератора ТГ-1 : ряд 1 – без учета нагрева, ряд 2 – равномерный нагрев ротора до 180⁰С.

Таблица № 2

N, тыс.об/мин		0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
Ряд 1	P	-101	-101	-99	-97	-93	-88	-82	-75	-67	-58	-48
	σ_M	-101	-100	-95	-87	-75	-61	-43	-22	2	30	61
	σ_B	382	384	387	394	403	414	429	445	465	487	512
Ряд 2	P	-80	-80	-78	-76	-72	-67	-61	-54	-46	-37	-27
	σ_M	-80	-79	-74	-66	-54	-40	-22	-1	23	51	82
	σ_B	303	305	308	315	324	335	350	367	386	408	433

Расчеты показали, что при равномерном нагреве ротора ТГ-1 до температуры 180⁰С происходит уменьшение начального натяга до величины $\Delta=40$ мкм (т.е. на 10 мкм), что в свою очередь приводит к понижению контактного давления. Частота вращения, при которой центр магнита переходит в растяжение понижается с 158 тыс.об/мин до 141 тыс.об/мин. Таким образом, коэффициент запаса магнита при нагреве снижается до значения :

$$k_M = \frac{\omega_0}{\omega_p} = \frac{N_0[\text{тыс.об} / \text{мин}]}{N_p[\text{тыс.об} / \text{мин}]} = \frac{141}{100} \approx 1,4 \quad (3)$$

Однако, при этом коэффициент запаса бандажа заметно возрастает :

$$k_B = \frac{\sigma_T}{\sigma_B} = \frac{700}{335} \approx 2,1 \quad (4)$$

При конструировании экспериментального турбогенератора была разработана оригинальная технология изготовления ротора на постоянных магнитах с бандажом. Испытания подтвердили его высокую надежность. Генератор показан на рис. 7, а общая схема ротора – на рис. 1 (самый верхний рисунок).



Рис. 7. Внешний вид высокооборотного фреонового турбогенератора ТГ-1 на лепестковых газодинамических подшипниках.

С помощью составленных расчетных программ был осуществлен подробный анализ конструкций роторов на постоянных магнитах с бандажом. В результате были получены ценные сведения об особенностях данных конструкций, что позволило сделать следующие ВЫВОДЫ :

1. Увеличение натяга бандажа приводит к увеличению запаса прочности магнита, но одновременно уменьшает запас прочности бандажа.
2. Уменьшение модуля упругости E бандажа приводит к заметному уменьшению запаса прочности магнита.
3. Для низкооборотных и мало нагруженных роторов в качестве бандажа можно применить алюминиевые сплавы типа АК-4...АК-8, латунь ЛС59-1 или нержавеющую сталь 12Х18Н10Т.
Для высокооборотных и сильно нагруженных роторов в качестве бандажа можно применить титановые сплавы типа ВТ6 или хром-никелевый сплав 36НХТЮ. Сплав 36НХТЮ предпочтительней титана.
4. По сравнению с ротором со сплошным магнитом применение конструкций с магнитопроводом уменьшает растягивающие напряжения в магните, что позволяет уменьшить величину натяга бандажа.
5. При равномерном нагреве ротора могут возникнуть три различных ситуации :
 - при равенстве коэффициентов линейного расширения бандажа и центральной части вала $\alpha_B = \alpha_V$ дополнительных тепловых деформаций не возникает ;
 - если $\alpha_B < \alpha_V$, то величина натяга увеличивается, в результате этого запас прочности у магнита увеличивается, а у бандажа уменьшается ;
 - если $\alpha_B > \alpha_V$, то величина натяга уменьшается, в итоге запас прочности у магнита уменьшается, а у бандажа увеличивается.

6. При запуске газовой турбомашины из «холодного» состояния в случае резкого нагрева периферии ротора запас прочности магнита существенно уменьшается. В этом случае рекомендуется запускать ротор на 50% от расчетного режима по частоте вращения, сделать выдержку несколько минут для прогрева конструкции, и только потом поднять обороты до номинала.
7. Применение редкоземельных самарий-кобальтовых магнитов и бандажа из хром-никелевого сплава 36НХТЮ позволяет создать ротор электропривода, способный работать при температуре 250⁰С. Рабочую температуру ротора можно увеличить до 350...400⁰С, если применить для бандажа другие сплавы.

ЛИТЕРАТУРА

1. И.А. Биргер, Б.Ф. Шорр, Г.Б. Иосилевич, Расчет на прочность деталей машин, Справочник, – М., Машиностроение, 1993 г, стр. 325-327.

2015 г.

P.S.

Фирма «МЕХТУРБО» предлагает услуги по расчету на прочность конструкций роторов на постоянных магнитах с цельнометаллическим бандажом. Обращаться на наш сайт :

info@mecturbo.ru
<http://mecturbo.ru/>