

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Г.В. Суханкин, О.К. Никольский, Н.Т. Герцен, Н.П. Воробьёв

В данном измерительном комплексе используется метод диагностики состояния изоляции электрических машин на основе затухания акустической волны, генерируемой взаимодействием проводников обмотки. С помощью такого комплекса можно определять степень теплового старения изоляции на различных этапах эксплуатации электродвигателя.

Ключевые слова: измерительный комплекс, электродвигатель, акустическая волна, тепловое старение.

1. Введение

Изоляция – один из главных элементов, определяющих надежность работы электродвигателя одновременно являясь ее самой уязвимой частью. Повреждение изоляции обмоток приводит к выходу из строя электродвигателей, восстановление которых достаточно трудоёмко и дорого, помимо этого нарушается технологический процесс, появляются вынужденные простои, что, в конечном счете, приводит к экономическим потерям, увеличению себестоимости продукции. Таким образом, диагностика и контроль состояния изоляции одна из самых сложных и ответственных задач профилактики электрических машин. Эффективные средства и методы диагностики состояния изоляции могли бы в значительной степени решить проблему эксплуатационной надежности. На сегодняшний день разработаны методики и приборы, позволяющие измерять без вывода из эксплуатации электродвигателя одну из основных прочностных характеристик - упругость изоляции, которая самым существенным образом связана со степенью её теплового старения [1]. Ранее в работах [2,3] разрабатывались методики и технические средства, которые позволяли контролировать физико-механические показатели изоляции на этапе ремонта и её электрические показатели на этапе эксплуатации электродвигателей. Немаловажным обстоятельством, влияющим на актуальность и необходимость измерения физико-механических показателей изоляции, является их связь с её поверхностным и объёмным увлажнением, температурой, составом применяемых материалов и др. Эти факторы напрямую связаны условиями эксплуатации электродвигателя. Используемые при изготовлении или ремонте полимерные пропиточные материалы по своим характери-

кам должны выдерживать негативные условия эксплуатации, имеющие место, как в промышленности, так и в агропромышленном комплексе. Это в первую очередь касается их физико-механических характеристик, так как недостаточный запас механической прочности, задаваемый при изготовлении или ремонтных операциях резко снижает надёжность и срок службы электрической машины. Однако даже имея в распоряжении высококачественные пропиточные материалы, необходимо вести профилактический контроль показателей изоляции во время эксплуатации электродвигателя в целях предотвращения неожиданного выхода его из строя из-за нарушения межвитковой или корпусной изоляции. Зная начальные значения показателей изоляции, отражающие по сути её качество, скорость ухудшения её характеристик в результате действия негативных факторов эксплуатации можно осуществлять прогноз её состояния в дальнейшем. В работе [4] акцент делался именно на определение качественных показателей изоляции во время ремонта. Диагностированию подвергались материалы, которые в дальнейшем использовались в качестве изоляции обмоток. В настоящей статье рассматривается возможность технической диагностики во время эксплуатации. Существует около десятка различных методов диагностики состояния изоляции обмоток. Почти все они контролируют электрические параметры изоляционной конструкции и поэтому эти методы можно отнести к категории электрических. Преимуществом этих методик является их относительная простота, так как такие параметры электрической цепи как ток, напряжение, заряд и ряд их производных известны очень давно, а их измерение не представляет большого труда и квалификации. Однако ни одна из этих методик не может дать объективной оценки

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

состояния изоляции хотя бы потому, что отсутствует возможность измерения упругих характеристик. А по данным [5-9] даже кратковременные импульсные механические напряжения, составляющие 80% от предела прочности изоляции ускоряют время выхода её из строя в 2 раза. Кроме того, недостатком существующих электрических методик является их неуниверсальность. Так, например, одни методики контролируют влажность, другие - пористость, третьи - электрическую прочность и т.д. Поэтому в данной статье рассматривается возможность оценки физико-механического состояния изоляции акустическим методом.

Контроль материалов с помощью акустических, в частности, ультразвуковых волн известен давно. Подобные методики успешно применяются в области дефектоскопии, медицины, в различных технологических процессах. Для визуального наблюдения скрытых частей какого-либо объекта обычно используется метод отражения, заключающийся в отражении на границе двух сред части зондирующего акустического луча из-за разных акустических сопротивлений (импедансов) этих сред. Для оценки свойств и состояния материала используется метод, базирующийся на измерении скорости распространения акустической волны. Однако для сложных геометрических и неоднородных объектов эти методы непригодны. Наиболее приемлемым для диагностики состояния изоляции обмоток является метод, основанный на измерении затухания акустической волны.

У многочисленных материалов, обозначаемых общим термином «изоляция», затухание звука, от которого зависит возможность контроля, колеблется от умеренных значений для твёрдых материалов и материалов без наполнителя типа эпоксидной смолы, до очень высоких у мягких разновидностей типа поливинилхлорида. Последний является очень хорошим поглотителем звука даже при самых низких частотах, применяемых при диагностике материалов. Следовательно, твёрдость полимера может быть ориентировочным критерием пригодности её для акустического контроля. Факт, что полутвёрдое состояние среды оказывает наибольшее сопротивление звуковой волне по сравнению с её жидкой и твёрдой фазой, может быть хорошо прослежено уже при отверждении изоляции во время пропиточных операций. С началом отвердевания амплитуда проходящего акустического импульса уменьшается и лишь после отверждения она снова увеличивается в связи с изменением физико-

механических параметров среды. Значительно влияет на величину затухания и скорость волны степень увлажнения изоляции. Затухание значительно уменьшается при переходе от сухого состояния к насыщенному влагой. На частоте 100 кГц соотношение амплитуд входящих в среду и выходящих из неё импульсов могут составить 1:10. Это необходимо учитывать при диагностике старой, но увлажнённой изоляции.

2. Теоретическая часть

Суть метода измерения заключается в подаче в обмотку статора электродвигателя синусоидального диагностического тока определённой частоты и амплитуды. При этом объект диагностирования отключен предварительно от сети. При этом возникают акустические напряжения p_0 и p_1 , изменяющиеся также по синусоидальному закону. Параметр p_0 – порождается магнитным взаимодействием проводников обмотки электродвигателя, а p_1 – является звуковым давлением в области датчика.

Экспериментально измеряемой величиной в рассматриваемом комплексе является коэффициент поглощения акустической волны:

$$\alpha = \frac{1}{x} \ln \frac{p_0}{p_1}, \quad (1)$$

где x – длина пути акустической волны в различных средах

В процессе воздействия тепла на изоляцию обмоток электродвигателя, что имеет место при его эксплуатации, комплексный модуль упругости $|E^*| = \sqrt{E' + E''}$, где E' , E'' – соответственно динамический модуль упругости и модуль потерь изоляции, возрастает многократно, особенно в начальный период эксплуатации. Следовательно, увеличение упругих характеристик изоляции согласно формулам (2) и (3) снижает коэффициент поглощения акустической волны.

$$E' = \frac{\rho c^2 \left[1 - \left(\frac{\alpha \lambda}{2\pi} \right)^2 \right]}{\left[1 + \left(\frac{\alpha \lambda}{2\pi} \right)^2 \right]^2}, \quad E'' = \frac{\rho c^2 \frac{\alpha \lambda}{2\pi}}{\left[1 + \left(\frac{\alpha \lambda}{2\pi} \right)^2 \right]^2}, \quad (2, 3)$$

где; ρ – плотность изоляционного материала; λ – длина волны; c – скорость распространения волны [10].

В общем виде

$$\alpha = f(\rho, c, \lambda, |E^*|), \quad (4)$$

Следовательно, по (4) при фиксированных c и λ , тепловое старение изоляции при-

водит к увеличению амплитуды акустического шума, по величине изменения которой, можно судить о степени старения изоляции электродвигателя.

3. Источник эталонного акустического напряжения измерительного комплекса

Для калибровки акустоэлектрического тракта и измерительных устройств необходимо иметь в наличии источник эталонных акустических напряжений. Конструкция такого источника напряжения изображена на рис. 1. В электропроводящей поверхности акустические колебания возникают вследствие взаимодействия электрических зарядов. Необходимым условием для этого должно быть то, что эта поверхность должна являться одной из обкладок конденсатора. В результате скопления электрических зарядов на пластинах конденсатора возникают механические силы, которые приводят к изменению расстояния между ними. Таким образом, конденсатор можно рассматривать как источник акустических сигналов. Такая ёмкость подключается к источнику переменного напряжения. Регулирование амплитуды акустического сигнала достигается либо изменением размаха переменного напряжения U_1 , либо изменением величины постоянного смещения U_0 . Точность источника калиброванного сигнала зависит от точности измерения h и U .

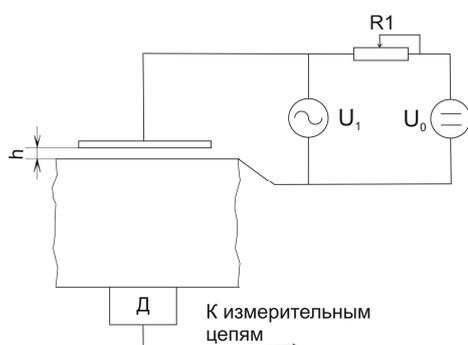


Рисунок 1 – Источник эталонных акустических напряжений: Д – датчик, R1 – подстроечный резистор

Известно, что напряжение акустического поля при излучении можно оценить исходя из того, что сила является производной от энергии электрического поля по направлению перемещения поверхности:

$$p = \frac{1}{S} \frac{d}{dh} \left(\frac{CU^2}{2} \right) = \frac{1}{S} \frac{d}{dh} \left(\frac{U^2 \epsilon_0 \epsilon S}{h} \right) = - \frac{U^2 \epsilon_0 \epsilon}{h^2}$$

где h , C , S – расстояние между пластинами, ёмкость, площадь конденсатора, соответственно. Разноимённые заряды, скапливающиеся на пластинах заставляют их притягиваться, причём максимальные значения сил будут происходить на вершинах отрицательных и положительных полувольт, если речь идёт о гармоническом напряжении. Таким образом, частота механических колебаний будет равна удвоенной частоте электрического напряжения. Для избежания удвоения частоты в схему вводят постоянное напряжение смещения U_0 , превосходящее переменное напряжение. Тогда $U^2 = (U_0 + U_1)^2 = (U_0^2 + 2U_0U_1 + U_1^2)$. В связи малости последнего члена, переменную составляющую акустического напряжения можно записать так [11]:

$$p = - \frac{U_0 U_1 \epsilon_0 \epsilon}{h^2}$$

Для воздушного зазора $\epsilon=1$. Таким образом, достигается развязка между акустической и электрической цепями.

4. Акустоэлектрический тракт измерительного комплекса (рис. 2)

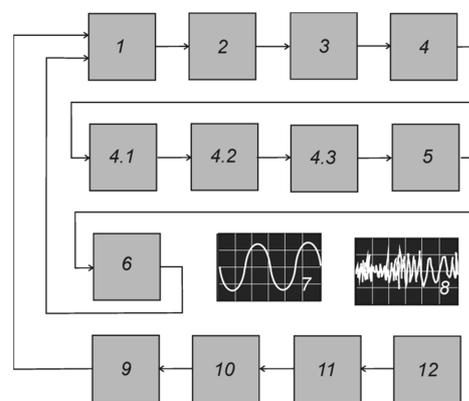


Рисунок 2 – Блок-схема измерительного комплекса: 1 – измерительная карта, 2 – усилитель, 3 – щиток асинхронного электродвигателя (АД), 4 – обмотка статора АД, 4.1 – изоляция провода, 4.2 – воздушный зазор, 4.3 – сталь, 5 – акустический преобразователь, 6 – усилитель, 7 – усиленный синусоидальный сигнал, 8 – усиленный принимаемый сигнал, 9 – шина PCI компьютера, 10 – материнская плата, 11 – программный пакет, 12 – блок задания значений λ , ρ , c , $E_{ном}$ и режимов эксплуатации

Устройство для акустической диагностики изоляции обмоток АД работает следую-

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

щим образом. В измерительной карте 1 генерируются синусоидальный электрический сигнал с частотой 5-30 кГц, который усиливается в усилителе 2, поступает на щиток 3, с него – на обмотку 4 статора. В обмотке 4 статора электрический сигнал преобразуется в акустический сигнал, который проходит последовательно через изоляцию обмотки, сердечник и станину.

Акустические колебания воспринимаются преобразователем 5 и преобразуются в нем в электрические колебания. Электрические колебания усиливаются в усилителе 6 и поступают в измерительную карту 1.

По (1) и по известным формулам (в общем виде $E=f(\alpha)$) последовательно определяются динамический модуль упругости E' , модуль потерь E'' , комплексный модуль E^* , абсолютное значение $|E^*|$ модуля упругости изоляции статора АД.

По зависимостям модуля упругости от времени теплового старения изоляции определяется номинальное значение модуля упругости $E_{ном}$ для конкретного режима, что основано на экспериментальных данных по модулю упругости E различных типов изоляции в функции времени при тепловом старении асинхронных двигателей серии 4А мощностью 1,5 кВт (рис. 3). Эксперименты проводились до отказа АД (пробой изоляции) [12].

Из соотношения между номинальным значением модуля упругости $E_{ном}$, измеренным модулем упругости E изоляционного материала в обмотке статора АД и нормированным значением $E_{норм}$ модуля упругости определяют нормированное значение модуля упругости $E_{норм}$ для конкретного режима:

$$E_{норм} = \frac{E_{ном}}{E} \quad (5)$$

При этом при реализации способа используют режимы эксплуатации АД при температурах изоляции 90°C, или 75°C, или 50°C.

Определяют необходимые условия эксплуатации АД и по графику 1, или 2, или 3 (рис. 3) определяют прогнозные оценки времени работы АД по состоянию изоляции при различных режимах эксплуатации τ_{x1} , τ_{x2} , τ_{x3} , находят остаточный ресурс $\tau_{ост1}$, $\tau_{ост2}$, $\tau_{ост3}$ работы АД в конкретных условиях эксплуатации по соотношениям

$$\tau_{ост1} = \tau_{o1} - \tau_{x1}, \quad (6)$$

$$\tau_{ост2} = \tau_{o2} - \tau_{x2}, \quad (7)$$

$$\tau_{ост3} = \tau_{o3} - \tau_{x3}, \quad (8)$$

поскольку определение остаточного ресурса АД в процессе теплового старения изоляции приведено на рис. 4, которая получена

из рис. 3 с учетом замены величины E на $E_{норм}$ по (5).

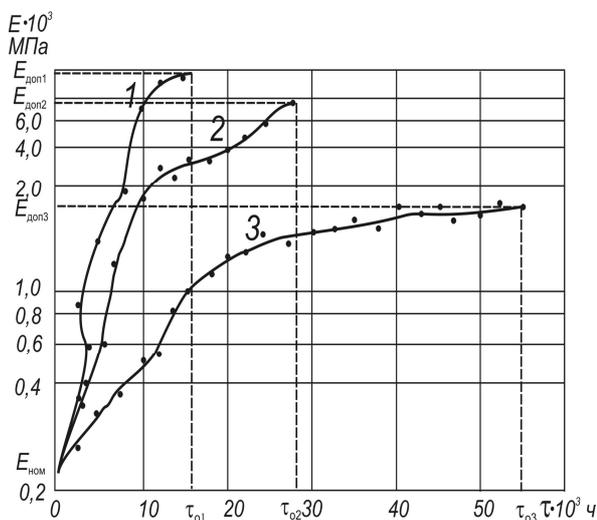


Рисунок 3 – Зависимость модуля упругости E от времени теплового старения τ изоляции системы ПЭТВ (провод)+КП-34 (компаунд): $E_{доп1}$, $E_{доп2}$, $E_{доп3}$ – предельно допустимые значения модуля упругости изоляции (после которых происходит ее пробой), полученные для соответствующих времен отказа τ_{o1} , τ_{o2} , τ_{o3} , АД, $E_{ном}$ – номинальное значение модуля упругости изоляции 1, 2, 3, полученные для $\tau = 0$; кривая 1 получена при температуре 90°C, 2 – при температуре 75°C, 3 – при температуре 50°C

Для других типов изоляции и АД определение остаточного ресурса проводится аналогично [12].

Программным пакетом 9 с учетом данных блока 10 определяются коэффициент поглощения α , динамический модуль упругости E' , модуль потерь E'' , комплексный модуль упругости E^* , его абсолютную величину, номинальное значение модуля упругости $E_{ном}$ и нормированное значение модуля упругости $E_{норм}$ для конкретного типа изоляции. Программным пакетом 9 с учетом условий эксплуатации АД при температуре 90°C, 75°C, или 50°C по экспериментальным графикам 1, 2, 3 (рис. 4) по изменению нормированного модуля упругости $E_{норм}$ изоляционного материала в обмотке статора асинхронного двигателя в процессе теплового старения изоляции определяется остаточный ресурс работы АД $\tau_{ост1}$, $\tau_{ост2}$, $\tau_{ост3}$ по формулам (6–8).

Таким образом, разработанный программно-аппаратный комплекс позволяет производить оценку остаточного ресурса АД.

5. Экспериментальные данные на примере АД

Нами получены экспериментальные данные по модулю упругости E различных типов изоляции в функции времени при тепловом старении асинхронных двигателей серии 4А мощностью 1,5 кВт, (рис. 3). Испытания проводились до отказа АД (пробой изоляции).

6. Практические результаты и выводы

Определение остаточного ресурса АД в процессе теплового старения изоляции приведено на рис. 4, который получен из рис. 3 с учетом замены величины E на $E_{\text{норм}}$. Режимы эксплуатации: кривая 1 получена при температуре 90°C, 2 – при температуре 75°C, 3 – при температуре 50°C; $E_{\text{нормх}}$ – текущее нормированное значение модуля упругости изоляционного материала в обмотке статора АД. Таким образом, τ_{x1} , τ_{x2} , τ_{x3} можно рассматривать как прогнозные оценки времени работы АД по состоянию изоляции при различных режимах эксплуатации, а τ_{o1} , τ_{o2} , τ_{o3} – как прогнозные оценки времени эксплуатации АД в режимах 1, 2, 3 на этом рисунке.

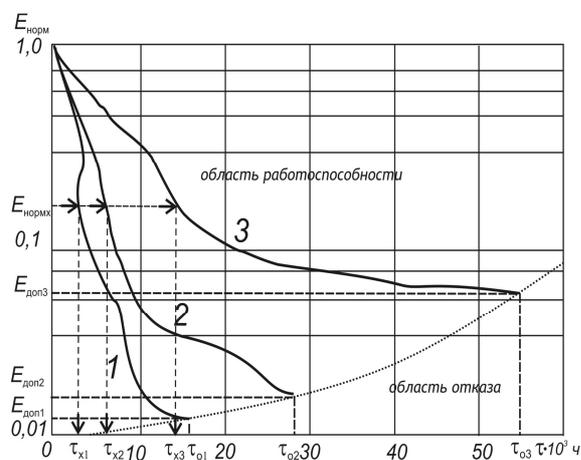


Рисунок 4 – Определение остаточного ресурса АД через изменение нормированного модуля упругости $E_{\text{норм}}$ изоляционного материала в обмотке статора асинхронного двигателя в процессе старения изоляции

Таким образом, пооперационное выполнение способа сводится к следующему. Генерируют синусоидальные электрические колебания, частоту синусоидальных электрических колебаний выбирают равной 5-10 кГц, усиливают электрические колебания, прикладывают их к обмотке статора АД так, чтобы в

обмотке статора АД протекал синусоидальный ток амплитудой 1 А, принимают акустические колебания с поверхности корпуса статора АД, преобразуют их в электрические колебания, усиливают, сравнивают их со сгенерированными электрическими колебаниями, определяют коэффициент затухания α акустических колебаний в изоляции АД, по значению α вычисляют по (1) модуль упругости E , определяют по графику (рис. 4) номинальное значение модуля упругости $E_{\text{ном}}$ для конкретного режима, определяют по (5) нормированное значение модуля упругости $E_{\text{норм}}$ для конкретного режима, определяют условия эксплуатации АД и по графику (рис. 4) по кривой 1, 2 или 3 определяют прогнозные оценки времени работы АД по состоянию изоляции при различных режимах эксплуатации τ_{x1} , τ_{x2} , τ_{x3} , находят остаточный ресурс τ_{o1} , τ_{o2} , τ_{o3} работы АД в конкретных условиях эксплуатации по соотношениям (6-8)

Таким образом, показатель E можно использовать в качестве дополнительного диагностического параметра состояния изоляции электродвигателей.

Областью применения разработанных технических средств является оценка качества изоляции электрических машин, прогнозирование состояния изоляции, измерение её физико-механических параметров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Суханкин, Г.В. Модель взаимодействия акустического сигнала и изоляции статора электрической машины, подверженной старению [Текст] / Г.В. Суханкин, Н.Т. Герцен. – Ползуновский вестник. – №4. – 2009. – С.124-132.
2. Суханкин, Г.В. Компьютерная система акустической диагностики изоляции электрических машин [Текст] / Н.Т. Герцен, Г.В. Суханкин. – Ползуновский вестник. – №4. – 2007. – С.146-154.
3. Суханкин, Г.В. Техническая диагностика и остаточный ресурс электроустановок: Монография [Текст]/ О.К. Никольский, Н.П. Воробьев, Н.Т. Герцен, А. Ф. Костюков, П.И. Семичевский, Г.В. Суханкин, Н.И. Черкасова, Г.А. Гончаренко, под общ. ред. заслуженного деятеля науки и техники России, докт. техн. наук, проф. О. К. Никольского. – Барнаул: Изд-во АДП, 2013. – 207 с.
4. Суханкин, Г.В. Ультразвуковая диагностика изоляции обмоток асинхронных электродвигателей в условиях агропромышленного комплекса: дис. ... канд. тех. наук: 05.20.02 / Суханкин Геннадий Владимирович; Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова. – Барнаул, 2002. – 187 с.
5. Гладков А.Э. Электроизоляционные лаки и компаунды. – М.: Энергия, 1973. – 247 с.

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

6. Гольдберг О.Д. Надёжность электрических машин общепромышленного и бытового назначения. Материалы лекций. М.: Знание, 1976. – 57 с.

7. Козырев Н.А. Изоляция электрических машин и методы её испытаний. М. – Л.: Госэнергоиздат, 1962. – 264 с.

8. Кан К.Н., Николаевич А.Ф. Шанников В.М. Механическая прочность эпоксидной изоляции. – Л.: Энергия, 1973.

9. Галушко А.И., Максимова И.С., Оснач Р.Г., Хазановский П.М. Надёжность изоляции электрических машин. М.: Энергия, 1979. – 176 с., ил.

10. Перепечко И.И. Акустические методы исследования полимеров. – М.: Химия, 1973, – 289 с.

11. Ермолов И.Н. Теория и практика ультразвукового контроля. – М.: Машиностроение, 1981. – 240 с., ил.

12. Пат. 2436081 Российская Федерация, МПК G 01 N 29/11 (2006/01). Способ акустической диагностики изоляции обмоток асинхронного электродвигателя / Герцен Н.Т., Суханкин Г.В., Воро-

бьев Н.П.; заявитель и патентообладатель ГОУВ-ПО «Алт. гос. техн. ун-т. им. И.И. Ползунова (АлтГТУ) – № 2010129672/28; заявл. 15.07.2010; опубл. 10.12.2011, Бюл. № 34. – 12 с.: ил.

Никольский О.К. - АлтГТУ им. И.И. Ползунова, заведующий кафедрой «Электрификация производства и быта», д.т.н., профессор,

E-mail: elnis@inbox.ru,

тел. (385-2) 36-71-29.

Суханкин Г.В. - к.т.н., директор ИПЦ, АлтГТУ,

тел. (385-2)29-07-44,

E-mail: gen195@mail.ru

Герцен Николай Теодорович - к.т.н., доц. ИнАрхДиз, АлтГТУ, тел. (385-2)29-07-44, *E-mail: instibox@mail.ru*