

УДК 621.3.01

**С. Н. Лутай, В. В. Коломиец, Б. Б. Кобылянский**, кандидаты техн. наук,  
**И. В. Булгакова**

### МЕТОДЫ И АНАЛИЗ ДИАГНОСТИКИ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

*Аннотация.* Рассматриваются современные методы диагностики асинхронных двигателей и причины низкой эффективности их использования в промышленности. Приводятся результаты сравнительного анализа данных методов, а также предлагается новый универсальный метод оценки состояния электродвигателей, основанный на использовании принципов контроля вихревых токов.

*Ключевые слова:* электродвигатель, гармоники, диагностика, внешнее электромагнитное поле, электрические колебания, ресурс двигателя, контроль вихревых токов

**S. N. Lutay, PhD., V. V. Kolomyets PhD., B. B. Kobylansky PhD.,**  
**I. V. Bylgakova**

### METHODS AND ANALYSIS OF DIAGNOSTICS OF ASYNCHRONOUS ELECTRIC MOTORS

*Abstract.* In the article the modern methods of diagnostics of asynchronous engines and reason of subzero efficiency of their use are examined in industry. Results over of comparative analysis of these methods are brought, and also the new universal method of estimation of the state of electric motors, based on the use of principles of vortex-current control, is offered.

*Keywords:* electric motor, accordions, diagnostics, external electromagnetic field. electric coleban, resource of motor. vortex-current control

**С. М. Лутай, В. В. Коломієць, Б. Б. Кобилянський**, кандидати техн. наук,  
**І. В. Булгакова**

### МЕТОДИ І АНАЛІЗ ДІАГНОСТИКИ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ

*Анотація.* Розглядаються сучасні методи діагностики асинхронних двигунів і причини низької ефективності їх використання в промисловості. Наводяться результати порівняльного аналізу цих методів, а також пропонується новий універсальний метод оцінки стану електродвигунів, заснований на використанні принципів контролю вихрових струмів.

*Ключові слова:* електродвигун, гармоніки, діагностика, зовнішнє електромагнітне поле, електричні коливання, ресурс двигуна, контроль вихрових струмів

**Постановка задачи исследования.** Проблема обеспечения высокой надежности работы электродвигателей с каждым годом становится все более актуальной, так как старение оборудования значительно опережает темпы технического перевооружения. Указанная проблема усугубляется отсутствием научно-обоснованной концепции технической диагностики и определения ресурса, а также недостаточной эффективностью традиционных методов диагностики и контроля.

**Методы решения.** Для оценки состояния рассматриваемой электрической машины в целом используются методы, которые чаще всего основаны на измерении следующих величин:

- КПД двигателя;
- частоты вращения вала;
- вибрации машины;
- параметров электромагнитного поля АД.

В настоящее время существуют следующие методы функционального диагностирования двигателя:

- вибродиагностика;
- виброакустическая диагностика;
- тепловой метод;
- спектральный анализ фазных токов.

©Лутай С.Н., Коломиец В.В., Кобылянский Б.Б.,  
Булгакова И.В., 2014

Так, большинство современных методов вибрационной диагностики базируется на анализе вибрации работающих машин и оборудования. Эти методы составляют основу функциональной (рабочей) диагностики, несмотря на то, что режимы работы оборудования могут быть самыми разными – от установившихся (номинальных или специальных) до переходных, в т. ч. пусковых, импульсных и т. п. В функциональной диагностике электродвигателей и оборудования по вибрации используется информация, содержащаяся в характеристиках колебательных сил и свойствах колебательной системы.

Основным способом получения диагностической информации является спектральный анализ вибрации, измеряемой в разных точках и направлениях. Спектральный анализ низкочастотной вибрации электродвигателей и оборудования является одним из основных направлений функциональной диагностики, позволяющих обнаруживать до половины возможных дефектов машин роторного типа задолго до возникновения аварийной ситуации.

Основной недостаток этого метода заключается в невозможности контроля состояния изоляции обмотки электрической машины, а по статистическим данным аварии из-за повреждения изоляции составляют значительную часть из общего числа аварий [2].

В свою очередь, тепловой метод диагностирования АД применяется при их рабочих режимах функционирования [3]. При этом определяются параметры тепловых процессов, сопровождающие электромагнитные процессы при нарушениях нормальных режимов и старении конструкционных материалов, в частности, температура в пазах статора, стержнях ротора, щеточно-контактного аппарата, охлаждающих жидкостей и т. д.

К недостаткам теплового метода диагностирования относятся:

- сложность реализации контроля состояния подвижных элементов объектов;

- большая тепловая инерция, вследствие чего по нагреву двигателя в целом нельзя сделать уверенного вывода о техническом состоянии его отдельных частей;

- необходимость хорошего доступа к отдельным частям АД, как правило, трудно доступным для наблюдения теплового изображения в приемных устройствах электроннооптического преобразователя, что часто бывает практически затруднено при эксплуатации электродвигателей;

- относительно низкая достоверность получаемой информации из-за проблемы выбора оптимального режима теплового контроля (если в качестве дефектности выбирать максимальный температурный перепад, то оптимальный нагреватель должен иметь как можно большую мощность и работать бесконечно);

- большая продолжительность (фактически момент контроля сводится к моменту достижения объектом предельно допустимой температуры).

Метод виброакустической диагностики основан на измерении вибрационных параметров корпуса электрической машины и ее движущихся узлов [4]. Данный метод является наиболее распространенным для диагностики состояния АД, т. к. позволяет не только выявить уже развившуюся неисправность и предотвратить катастрофические разрушения, но и обнаружить развивающийся дефект на очень ранней стадии, что дает возможность прогнозировать аварийную ситуацию и обоснованно планировать сроки и объем ремонта оборудования.

В качестве эталона используются характеристики того же самого объекта диагностирования, измеренные на начальном этапе его эксплуатации.

Основные недостатки метода:

- множество состояний может быть разделено на два класса: работоспособное и неработоспособное, которые имеют большое число градаций и, следовательно, не могут излучать четко определяющего сигнала (вариации сигналов в пределах одного класса состояний является помехой для диагностирования);

- низкая защищенность метода от помех акустико-механического характера. Каждому состоянию электрической машины соответствует определенный акустический сигнал, который требуется распознать в процессе диагностирования. Из бесконечного числа возможных состояний АД должно быть отобрано конечное число, которое подлежит распознаванию при диагностировании. Следовательно, двигатели, находящиеся в одном и том же номинальном состоянии, т.е. в одном классе

состояний, излучают различные сигналы, хотя их действительные состояния несколько различны;

- сложность диагностической задачи, которая заключается в том, что оценивать поведение механизма приходится только по выходным колебательным процессам, не имея априорной информации ни о фактических входных воздействиях, ни о передаточных характеристиках механической системы;

- акустические сигналы сложных машин и механизмов – случайные процессы, тогда как информативными признаками являются довольно сложные характеристики процессов (корреляционные функции, биспектры, моментные функции распределения вероятностей и т.д.);

- проблема локализации и идентификации источников повышенной виброактивности;

- акустический сигнал имеет сложную структуру, зависящую от динамики механизма и взаимодействия комплектов его узлов. Электрический метод диагностирования основан на измерении электрических параметров, включающих в себя отклонения токов и напряжений от номинальных значений (по амплитуде, частоте, фазе), появление высоких гармоник в спектре токов, напряжений и т. д.

Возникновение межвитковых и межфазных замыканий, обрыв стержней в короткозамкнутом роторе, биение вала двигателя или генератора приводят к несимметрии фазных токов, увеличению амплитуды высших гармоник относительно первой гармоники, причем последнее особенно характерно для третьей гармоники. Дефекты подшипникового узла или нарушение центровки вала электродвигателя и приводимого им механизма вызывают модуляцию электромагнитного момента с частотой, пропорциональной частоте вращения вала. Это влечет за собой появление в токе статора дополнительных гармоник с частотами, пропорциональными частоте вращения. Сравнительный анализ спектров токов испытуемого двигателя, условно принятого за эталон, позволяет обнаружить перечисленные дефекты.

В зависимости от способа получения информации данный метод может осуществляться двумя способами: контактным и бесконтактным

Контактные измерения токов обычно требуют временного отключения электрической машины от цепи питания, что снижает оперативность диагностирования и усложняет процедуру измерения. При бесконтактном способе чаще всего используют датчики в виде токовых клещей [5]. Недостаток метода заключается в сложности поиска дефектного узла. Возникновение межвитковых и межфазных замыканий в обмотках асинхронного двигателя приводит к появлению в спектрах фазных токов высокочастотных гармоник. Наличие дефектов в подшипниковом узле электродвигателя или нарушение центровки вала вызывают периодические изменения момента сопротивления, что также приводит к искажению спектра фазных токов, в частности, в них появляются гармоники с комбинированными частотами. Амплитуда этих гармоник зависит от степени проявления дефекта, а также от напряжения питания. Таким образом, при наличии нескольких ис-

точников, вызывающих похожие изменения диагностических параметров, дать однозначную оценку технического состояния АД с указанием конкретного дефектного узла очень сложно [6].

Вихретоковые методы основаны на анализе взаимодействия внешнего электромагнитного поля с электромагнитным полем вихревых токов, наводимых возбуждающей катушкой в электропроводящем объекте контроля. Плотность вихревых токов в объекте зависит от геометрических и электромагнитных параметров объекта, а также от взаимного расположения измерительного вихретокового преобразователя (ВТП) и объекта. В качестве преобразователя используют обычно индуктивные катушки (одну или несколько). Синусоидальный или импульсный ток, действующий в катушках ВТП, создает электромагнитное поле, которое возбуждает вихревые токи в электропроводящем объекте. Электромагнитное поле вихревых токов воздействует на катушки преобразователя, наводя в них ЭДС или изменяя их полное электрическое сопротивление. Регистрируя напряжение на зажимах катушки или их сопротивление, получают информацию о свойствах объекта и о положении преобразователя относительно него. ЭДС (или сопротивление) преобразователя зависит от многих параметров объекта контроля, т. е. информация, даваемая преобразователем многопараметровая. Это определяет как преимущество, так и трудности реализации вихретоковых методов (ВТМ). С одной стороны, ВТМ позволяют осуществить многопараметровый контроль, с другой - требуются специальные приемы для разделения информации об отдельных параметрах объекта. При контроле одного из параметров, влияние остальных на сигнал преобразователя становится мешающим, поэтому это влияние необходимо уменьшать. Особенность вихретокового контроля в том, что его можно проводить без контакта преобразователя и объекта. Их взаимодействие происходит обычно на расстояниях, достаточных для свободного движения преобразователя относительно объекта (от долей миллиметра до нескольких миллиметров). Поэтому этими методами можно получать хорошие результаты контроля даже при высоких скоростях движения объектов. Получение первичной информации в виде электрических сигналов, бесконтактность и высокая производительность определяют широкие возможности автоматизации вихретокового контроля.

Одна из особенностей ВТМ состоит в том, что на сигналы преобразователя практически не влияют влажность, давление и загрязненность газовой среды, радиоактивные излучения, загрязнение поверхности объекта контроля непроводящими веществами.

Простота конструкции преобразователя еще одно преимущество ВТМ. В большинстве случаев катушки помещают в предохранительный корпус и заливают компаундами. Благодаря этому они устойчивы к механическим и атмосферным воздействиям, могут работать в агрессивных средах в широком интервале температур и давлений. До сих пор вихретоковые методы использовались преимущественно для контроля качества электропроводящих объектов: металлов, сплавов, графита, полупроводников, а также для дефектоскопии, опреде-

ления размеров и структуроскопии материалов и изделий [7]. В результате проведенного комплексного исследования была предложена новая сфера применения вихретокового контроля и разработан метод диагностики, который дает возможность проводить оценку состояния асинхронных электродвигателей без контакта с преобразователем, и позволяет получать удовлетворительные результаты контроля без необходимости прерывания обычного режима работы АД.

Таким образом, в силу описанных выше причин, существующие в настоящее время методы диагностики не могут широко использоваться на промышленных предприятиях. При этом одним из главных недостатков всех существующих методов является использование в качестве диагностических величин косвенных параметров, свидетельствующих о неисправностях, тогда как прямой параметр, определяющий все характеристики электродвигателя - это его внешнее магнитное поле (ВМП). Кроме того, применяемые в настоящее время методы и средства диагностики состояния двигателей требуют либо размещения непосредственно на оборудовании специальных датчиков (вибродиагностика), либо выведения АД из работы (измерения сопротивления изоляции, сопротивления обмоток и т. п.).

В свою очередь, при применении метода вихретокового контроля в диагностике электродвигателей, в качестве возбуждающей катушки используется обмотка двигателя. Выполненные теоретические исследования позволили установить, что характер внешнего магнитного поля электрических машин. Несимметрии, обусловленные возникшими дефектами, изменяют характер внешнего магнитного поля, вызывая спектр пространственных гармоник напряженности, что дает возможность использовать спектр напряженностей ВМП для диагностирования АД. Иные факторы, влияющие на измерение напряженности внешнего магнитного поля, не вызывают образования новых гармоник или непропорционального роста уже имеющихся. При этом была получена зависимость между наличием в двигателе дефектов и проявлением нечетных гармоник в спектре напряженности ВМП АД, что дало возможность разработать модель внешнего магнитного поля, позволяющую оперировать значениями напряженности ВМП первых 5-и гармоник в зависимости от состояния изоляции и конфигурации двигателя (размер зазора, шаг обмотки и др.) без учета экранирования.

Кроме того, было экспериментально доказано, что наличие в спектре напряженности ВМП АД гармоник, кратных 3, является диагностическим признаком межвитковых и межфазных замыканий обмотки статора, а проявление гармоник, кратных 2 – признаком эксцентриситета ротора. При этом обосновано, что ВМП АД целесообразно замерять на продолжении оси вала электродвигателя.

Таким образом, в результате проведенного исследования было установлено:

1) при механических повреждениях двигателя (неравномерность воздушного зазора при неисправностях подшипникового узла или искривлении вала) наблюдается возникновение четных гармоник в спектре напряженности ВМП;

2) при электрических неисправностях двигателя происходит рост нечетных гармоник электродвигателя относительно 1-й гармоника. При этом отклонение параметров напряжения от нормированных показателей качества электроэнергии приводит лишь к пропорциональному росту амплитуды гармоник.

Для того чтобы избежать влияния фактора качества электроэнергии и фоновых полей, целесообразно рассматривать в качестве диагностического параметра не значения амплитуд напряженности различных гармоник, а отношение разности рассматриваемой гармоники и любой четной к разности основного колебания и любой четной гармоники.

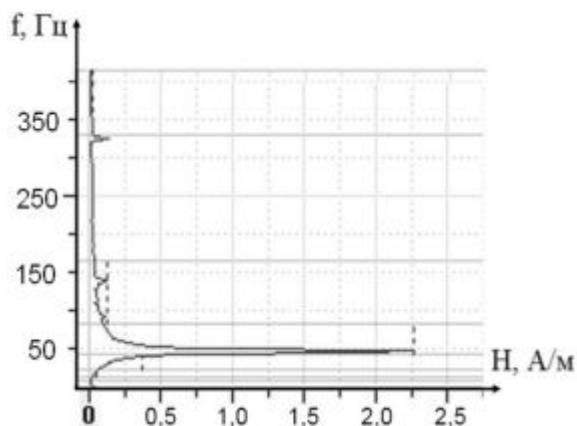


Рис. 1. Спектральный состав ВМП АД при отсутствии механических неисправностей

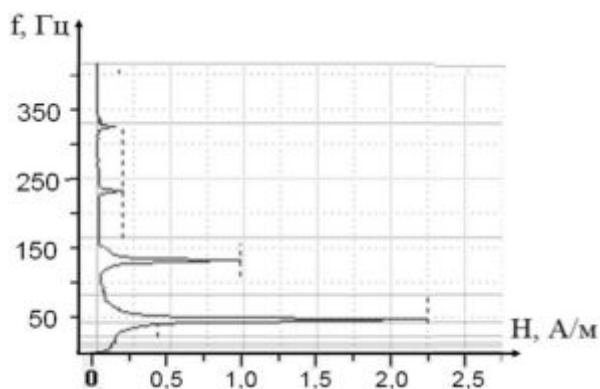


Рис. 2. Спектральный состав ВМП АД при межвитковом замыкании

Таким образом, учитывая, что факторы, влияющие на измерения напряженности внешнего магнитного поля, оказывают пропорциональное влияние на гармоники напряженности ВМП АД, был выбран диагностический параметр - коэффициент гармоник, позволяющий избавиться от факторов, воздействующих на поле двигателя, но не несущих информации о его состоянии:

$$K_v = \frac{H_v - H_{2n}}{H_1 - H_{2n}},$$

где \$H\_v\$ – значение напряженности рассматриваемой гармоники; \$H\_{2n}\$ – значение напряженности любой четной гармоники; \$H\_1\$ – значение напряженности основного колебания.

При этом установлено, что наиболее информативной гармоникой является 3-я, ибо она проявляется как при межвитковых замыканиях, так и при межфазных. Диагностика путем сравнения коэффициентов гармоник позволяет судить о наличии дефекта, так как существуют четкие различия между картинками напряженности внешнего магнитного поля при влиянии различных факторов. Таким образом, появляется возможность четко определять конкретный дефект в каждом случае. На основе полученных результатов были разработаны основные принципы регистрации напряженности ВМП двигателей, а также интерпретации полученных результатов и суждения о наличии и развитии в двигателе дефектов. Данные принципы явились основой для создания нового метода оценки состояния асинхронных электродвигателей в промышленности на основе анализа параметров их внешнего магнитного поля.

Кроме того, появилась возможность делать прогноз о техническом состоянии электродвигателя по значению коэффициента 3-й гармоники, по результатам которого могут быть разработаны рекомендации о дальнейшей эксплуатации электродвигателя в зависимости от конкретных значений рассматриваемого диагностического параметра [9].

Экспериментальные исследования позволили выделить 5 областей значений диагностического параметра, каждая из которых характеризуется особенностями состояния изоляции обмотки статора АД:

- \$K\_3 < 0,1\$ – двигатель исправен;
- \$0,1 < K\_3 < 0,4\$ – состояние двигателя нестабильно, характеризуется интенсивным повреждением изоляции и быстрым переходом в опасную стадию;
- \$0,4 < K\_3 < 0,7\$ – опасное состояние двигателя, возможен внезапный выход из строя;
- \$K\_3 > 0,7\$ – критическое состояние (данное значение было достигнуто в лабораторных условиях путем моделирования дефекта уже после запуска электродвигателя).

**Вывод.** В ходе выполненного исследования установлено, что выбор метода диагностики зависит от внешних условий, режима работы электрооборудования, однотипности диагностируемых объектов, уровня квалификации обслуживающего персонала и финансового положения предприятия.

Вместе с тем необходимо помнить, что диагностика асинхронных электродвигателей, в первую очередь, должна преследовать цель определения состояния изоляции обмоток статора АД, однако не все существующие методы способны адекватно оценить состояние.

Применение разработанного метода для промышленности позволит значительно сократить количество преждевременных отказов электродвигателей.

#### Список использованной литературы

1. Сафарбаков А. М. Основы технической диагностики : учебное пособие для студентов / А. М. Сафарбаков. – Иркутск : Изд-во ИрГУПС. – 2006. – С. 10 – 25.
2. Бронов С. А. Регулируемые электроприводы переменного тока / С. А. Бронов., В. И. Овсянников. – Красноярск : КГТУ. – 1998. – С. 34 – 40.

3. Дубов А. А. Проблемы оценки остаточного ресурса стареющего оборудования / А. А. Дубов// Теплоэнергетика. – 2003. – № 11. – С. 54 – 57.

4. Смирнов В. И. Автоматизированный вибродиагностический комплекс / В. И. Смирнов и др. // Автоматизация и современные технологии, 1999, 156 с.

5. Левачев А. В. Диагностика изоляции асинхронных электродвигателей на основе использования параметров схемы замещения обмоток / А. В. Левачев. – Барнаул. – 1998. – С. 45 – 51.

6. Гашимов М. А. Диагностические исследования неисправностей электроэнергетических машин при межфазных замыканиях в обмотке статора/ М. А. Гашимов // Электричество. – М. : – 1987. – № 4. – С. 27 – 30.

7. Сафарбаков А. М. Основы технической диагностики : учеб. пособие для студентов / А. М. Сафарбаков, А. В. Лукьянов, С. В. Пахомов. – Иркутск : Изд-во ИргУПС, 2006. – 215 с.

8. Бобров В. В. Зависимость спектра напряженности внешнего магнитного поля от технического состояния электродвигателя / В. В. Бобров // Наука, технологии, инновации. – Новосибирск : Изд-во НКТУ. – 2010. – С. 207 – 209.

9. Хомутов С. О. Комплекс мероприятий по повышению надежности электрических двигателей на основе достоверных методов диагностики / С. О. Хомутов . – 2010. – С. 15 – 35.

10. Хомутов С. О. Использование метода вихревого контроля для определения технического состояния асинхронных электродвигателей / С. О. Хомутов, В. В. Бобров. – 2011. – С. 132 – 144.

Получено 18.07.2014

#### References

1. Sabrakov A.M. Osnovy tehnicheckoj diagnostiki : ucheb. posobie dlja studentov [Bases of Technical Diagnostics: Teaching aid for Students], (2006), Irkutsk, Russian Federation, *Publishing House of Irkutsk State University of Communications*, pp. 10 – 25 (In Russian).

2. Bronov S.A., Oxsannicov V.I. Reguliruemye jelektroprivody peremennogo toka [The Managed Electromechanics of Alternating Current], (1998), Krasnoyarsk, Russian Federation, *CGTY*, pp. 34 – 40 (In Russian).

3. Dubov A.A. Problemy ocenki ostatochnogo resursa starejshhego oborudovaniya [Problems of Estimation of Remaining Resource of Senescent Equipment], (2003), *Teploingetic*, No. 11, pp 54 – 57 (In Russian).

4. Smirnov V.I. and other. Avtomatizirovannyj vi-brodiagnosticheskiy kompleks [ Automated Vibrodiagnostic automated Complex], (1999), *Automation and Modern Technologies*, 156 p. (In Russian).

5. Levahev V.I. Diagnostika izoljaccii asinhronnyh jelektrodvigatелеj na osnove ispol'zovaniya parametrov shemy zameshheniya obmotok, [Diagnostics of Isolation of Asinxron Electric Motors on the Basis of Ispolzovan Parameters of Chart of Substituting for Obmot Sciences], (1998), Barnaul, Russian Federation, p.p 45 – 51 (In Russian).

6. Gahimov M. A. Diagnosticheskie issledovaniya nei pra-vnostej jelektrojenergeticeskih mashin pri mezhfaz-nyh

zamykanijah v obmotke statora [Diagnostic Isledvan Disre-pairs of Eelectroenergy Mahin at the Shorting in the Puttee of stator], (1987), *Electricity*, Moscow Russian Federation, No. 4, pp. 27 – 30 (In Russian).

7. Saharbakov A.M., Luk'janov A.V., Pahomov S.V. Osnovy tehnicheckoj diagnostiki: ucheb. posobie dlja studentov [Bases of Technical Diagnostics: Studies. Manual for the Students], (2006), Irkutsk, Russian Federation, *Izd-vo IrGUPS*, 215 p. (In Russian).

8. Bobrov V.V. Zavisimost' spektra naprjazhennosti vneshnego magnitnogo polja ot tehnicheckogo sostojanija jelektrodvigatelja [Dependence of Spectrum of Tension of External Magnetic-Field on the Technical State of Electric Motor], (2010), *Nauka, Tehnologii, Innovacii*, Novosibirsk, Russian Federation, *Izd-vo NKTY*, pp. 207 – 209 (In Russian).

9. Homutov S.O. Kompleks meroprijatij po povysheniju nadezhnosti jelektriceskih dvigatелеj na osnove dostov-ernyh metodov diagnostiki [Complex of Measures on the Increase of Reliability of Electric Engines on the Basis of Reliable Methods of Diagnostics], (2010), pp. 15 – 35 (In Russian).

10. Homutov S.O., Bobrov V.V. Ispol'zovanie metoda vihretokovogo kontrolja dlja opredelenija tehnicheckogo sostojanija asinhronnyh jelektrodvigatелеj [The use of Method of Vortex-Current Control for Determination of the Technical State of Asynchronous Electric Motors], (2011), pp. 132 – 144 (In Russian).



Лутай Сергей Николаевич, канд. техн. наук, доц. каф. электроники и компьютерных технологий систем управления (ЭКТСУ). Учебно-научного профессионально-педагогического ин-та Украинской инженерно-педагогической академии (УИПА). 84500, г. Артемовск. Донецкая обл. ул. Носакова, 9а, Украина. Тел. 0502413255. E-mail: Dep09@ya.ruЭКТСУ



Коломиец Валерий Витальевич, канд. техн. наук, доц., директор Учебно научного профессионально педагогического института УИПА. Тел. 0990310429. E-mail: Dep09@ya.ru



Кобылянский Борис Борисович, канд. техн. наук, каф. ЭКТСУ. Учебно научного профессионально педагогического инсти-тута УИПА. Тел. 0500252906. E-mail: b.kobiljansky@yandex.ua



Булгакова Ирина Владимировна, ст. преподаватель Учебно научного профессионально педагогического института УИПА. г. Артемовск. Донецкая обл. E-mail: Dep09@ya.ru