

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ОСНОВНЫХ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

В.В. Бобров

*В статье рассматриваются современные методы диагностики асинхронных двигателей и причины низкой эффективности их использования в сельском хозяйстве. Приводятся результаты сравнительного анализа данных методов, а также предлагается новый универсальный метод оценки состояния электродвигателей, основанный на использовании принципов вихретокового контроля.*

*Ключевые слова: электродвигатель, гармоники, диагностика, внешнее электромагнитное поле.*

Как известно, прогресс современной науки и техники неразрывно связан с применением электрической энергии в различных производственных процессах. При этом надежность и ресурс используемого электрооборудования и конструкций определяют, так называемые, зоны концентрации напряжений (ЗКН) - основные источники развития повреждений. В частности, для асинхронных электродвигателей (АД), получивших наибольшее распространение в промышленности и сельском хозяйстве, ЗКН являются обмотки статора, в связи с чем все остальные элементы конструкции АД подбираются с учетом надежности изоляции его обмоток (рисунок 1) [1].

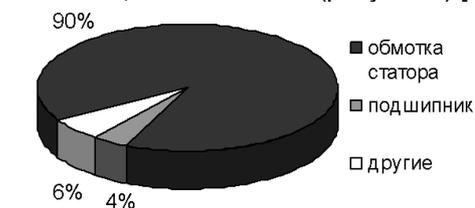


Рисунок 1 - Основные источники развития поврежденных электродвигателя

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.

Проведенный авторами анализ существующих подходов к оценке остаточного ресурса стареющего оборудования, сложившихся в различных отраслях хозяйства страны, позволил выявить общие проблемы, обусловли-

вающие указанную выше низкую эффективность традиционных методов диагностики.

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

- к.п.д. двигателя;
- частоты вращения вала;
- вибрации машины;
- параметров электромагнитного поля АД.

В настоящее время существуют следующие методы функционального диагностирования электродвигателей:

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

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 установленных (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 за-

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ОСНОВНЫХ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

долго 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 электронно-оптического 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 ре-

монта 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 и 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 источников, 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 контро-

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ОСНОВНЫХ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

ля качества электропроводящих объектов: металлов, сплавов, графита, полупроводников, а также для дефектоскопии, определения размеров и структуроскопии материалов и изделий [7]. В результате проведенного комплексного исследования авторами 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 и сельскохозяйственных 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 (рисунок 2). Иначе говоря, процесс диагностики АД вихретоковым методом значительно проще, чем в распространенных сферах применения вихретокового контроля [8].

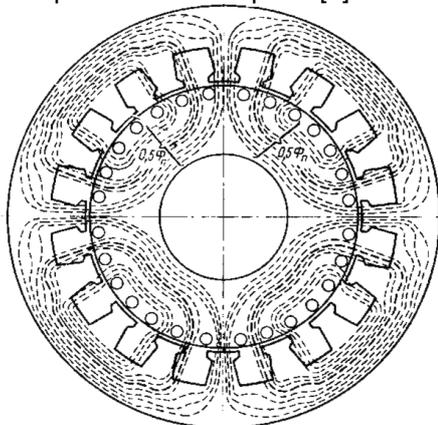


Рисунок 2 - Линии напряженности магнитного поля внутри асинхронного двигателя  
ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 3/1 2012

Выполненные авторами теоретические исследования позволили установить, что характер внешнего магнитного поля электрических машин в значительной мере определяется различного рода несимметриями обмоток статора и магнитной системы. 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, что видно на рисунках 3 и 4;

2) при электрических неисправностях двигателя происходит рост нечетных гармоник электродвигателя относительно 1-й, что хорошо заметно на рисунках 5 и 6.

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 напряженностей различных гармоник, а

отношение разности рассматриваемой гармоники и любой четной к разности основного колебания и любой четной гармоники.

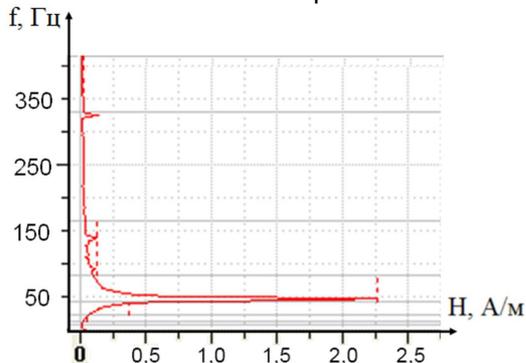


Рисунок 3 - Спектральный состав ВМП АД при отсутствии механических неисправностей

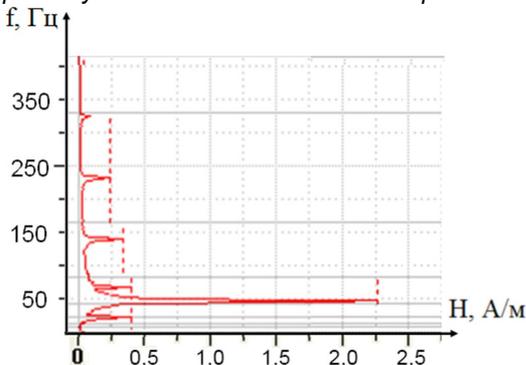


Рисунок 4 - Спектральный состав ВМП АД при эксцентриситете вала ротора

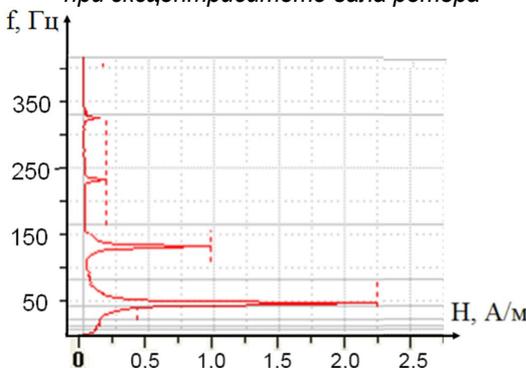


Рисунок 5 - Спектральный состав ВМП АД при межвитковом замыкании

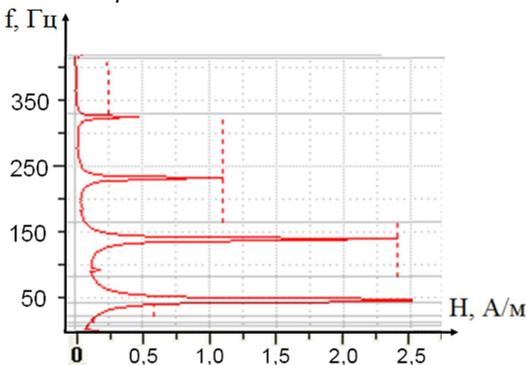


Рисунок 6 - Спектральный состав ВМП АД при межфазном замыкании

Таким образом, учитывая, что факторы, влияющие на замеры 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, т. к. она проявляется как при межвитковых замыканиях, так и при межфазных.

Диагностика путем сравнения коэффициентов гармоник позволяет судить о наличии дефекта, т. к. существуют четкие различия между картинами 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 сельском хозяйстве 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;

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ОСНОВНЫХ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

-  $0,4 < K_3 < 0,7$  - 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).

Данный метод не требует большого числа операций и специальных навыков, а также характеризуется высокой достоверностью получаемой информации, наглядностью и простотой реализации, что особенно актуально для двигателей, используемых в агропромышленном комплексе. Кроме того, метод позволяет корректировать режим работы электрооборудования, плановые диагностики и ремонты. Как следствие, это повысит коэффициент использования, что позволит оптимизировать распределение финансовых средств предприятия на своевременный ремонт и техническое обслуживание [10].

Таким образом, 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 этой зоны в условиях агропромышленного комплекса России. Применение разработанного авторами метода в условиях сельского хозяйства позволит значительно сократить количество преждевременных отказов электродвигателей, а также в целом повысить эффективность агропромышленного производства.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дубов, А.А. Проблемы оценки остаточного ресурса стареющего оборудования / А.А. Дубов // Теплоэнергетика. - 2003. - № 11. - С. 54-57.

2. Смирнов, В.И. Автоматизированный вибродиагностический комплекс / В.И. Смирнов и др. //

Автоматизация и современные технологии. - 1999. - № 10. - С. 23-28.

3. Левачев, А.В. Диагностика изоляции асинхронных электродвигателей на основе использования параметров схемы замещения обмоток : дис. ... канд. техн. наук / А.В. Левачев. - Барнаул, 1998. - 279 с.

4. Гашимов, М.А. Диагностические исследования неисправностей электроэнергетических машин при межфазных замыканиях в обмотке статора / М.А. Гашимов, А.К. Гусейнов // Электричество. - 1987. - № 4. - С. 27-30.

5. Гашимов, М.А. Диагностирование неисправностей обмотки статора электрических машин / М.А. Гашимов // Электрические станции. - 1998. - № 11. - С. 30-35.

6. Гашимов, М.А. Диагностирование неисправностей обмотки статора электрических машин / М.А. Гашимов, Г.А. Гаджиев, С.М. Мирзоева // Электрические станции. - 1998. - № 10. - С. 8-12.

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 : Материалы всероссийской научной конференции молодых ученых в 4-х частях. - Новосибирск : Изд-во НКТУ, 2010. - Часть 2. - С. 207-209.

9. Хомутов, С.О. Комплекс мероприятий по повышению надежности электрических двигателей в сельском хозяйстве на основе достоверных методов диагностики и эффективных технологий восстановления изоляции / С.О. Хомутов // Ползуновский вестник. - 2010. - № 4. - С. 15-21.

10. Хомутов, С.О. Использование метода вихретокового контроля для определения технического состояния асинхронных электродвигателей / С.О. Хомутов, В.В. Бобров // Ползуновский вестник. - 2011. - № 2/2. - С. 132-138.

**Бобров В.В.** - инженер производственно-технического отдела Открытого акционерного общества "Сетевая компания Алтайкрайэнерго" (г. Барнаул),  
e-mail: [bobrov@altke.ru](mailto:bobrov@altke.ru),  
тел.: 8 (3852) 24-37-62,