

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ НАЛИЧИИ В НИХ ДЕФЕКТОВ

Гребченко Н.В., Полковниченко Д.В.

Донецкий государственный технический университет

svf@elf.dgtu.donetsk.ua

The outcomes of experimental researches on definition of relations of the parameters describing steadied activity of asynchronous motors, steadied an activity, from a condition of stators windings (availability of short-circuit orbits) and a rotary table (availability of torn off rods), and also outcomes of validation of operation of a system of diagnostic of electric motors in an operational mode (without switching-off of the electric motor) and algorithms which were goped up in this system of diagnostic are adduced.

Разработка автоматизированной системы диагностирования электродвигателей в рабочем режиме является актуальной и объясняется необходимостью своевременного выявления наметившихся повреждений и возможностью планирования их устранения таким образом, чтобы не нарушался режим работы энергоблока электростанции или промышленного предприятия.

В настоящее время не завершена разработка единой теории диагностирования электродвигателей. На практике контроль технического состояния электродвигателей в основном осуществляется во время проведения плановых ремонтов, что не позволяет обнаружить зарождающиеся дефекты и предотвратить значительные повреждения электродвигателей вплоть до их полного выхода из строя.

Одним из основных этапов при разработке систем диагностики является определение наиболее информативных диагностических параметров. Обычно при выборе диагностических параметров исходят из того, что их изменение при возникновении дефекта должно превышать значение этих параметров при отсутствии дефектов с учетом имеющихся помех. Это требование затрудняло разработку систем диагностики в рабочем режиме, т.е. без отключения электрооборудования. Развитие средств измерительной и вычислительной техники позволяет проводить диагностирование в рабочем режиме работы электродвигателей за счет повышения точности измерения и обработки параметров режима [1-6].

Традиционно правила выявления возникновения дефекта основываются на том, что необходимо зафиксировать превышение соответствующим диагностическим параметром заданного критического значения [7]. Вместе с тем известно, что при возникновении дефекта происходит изменение одновременно нескольких параметров [8]. Видимо в последнем случае может быть обеспечена более высокая достоверность постановки диагноза некоторых дефектов, чем в первом случае. Разделив все дефекты на две группы (пакеты) может быть использован алгоритм диагностирования, представленный на рис. 1.

Алгоритм основан на том, что появление дефекта электродвигателя сопровождается изменением одного из параметров режима свыше допустимого или происходит незначительное изменение нескольких параметров режима, но их взаимные изменения не соответствуют изменению рабочего режима, т.е. являются несовместными.

Для определения зависимости параметров, характеризующих установившиеся режимы работы асинхронных электродвигателей (АД) с короткозамкнутым ротором от состояния обмоток статора (наличие короткозамкнутых витков) и ротора (наличие оборванных стержней), а также для проверки правильности функционирования системы диагностики АД в рабочем режиме (без отключения АД) и алгоритмов, заложенных в нее, в лаборатории кафедры «Электрические станции» ДонГТУ были проведены экспериментальные исследования.

В ходе проведения экспериментальных исследований фиксировались параметры рабочего режима АД (токи и напряжения), для измерения которых не требуется использование дополнительных датчиков. С использованием восьмиканального устройства регистрации параметров режима (УРПР) с десятиразрядными АЦП типа Ф-7077/1 проводилось цифровое осциллографирование фазных токов и напряжений опытных электродвигателей. Для измерения величины скольжения одновременно выполнялось осциллографирование частоты вращения АД путем подключения датчика частоты вращения типа ВЕ-178 к специальному входу УРПР. Частота дискретизации составляла 1000 Гц.

Для исследования режимов работы АД при обрыве стержней короткозамкнутого ротора использовался опытный АД 0,4 кВ, ротор которого модернизирован с целью обеспечения возможности имитации обрывов стержней обмотки. Для этого на вынутом роторе отрезаны и заменены боковые короткозамыкающие кольца, а во всех стержнях с двух сторон выполнены отверстия с резьбой. Выполненная модернизация позволяет имитировать обрывы стержней короткозамкнутой обмотки ротора. Для этого с помощью отвертки через отверстия в боковых крышках вывинчиваются болты, соединяющие стержень с короткозамыкающими кольцами.

Используемый способ имитации обрывов стержней имеет следующие недостатки [9]:

- частичное шунтирование магнитного потока в пазах ротора из-за использования стальных болтов;
- изменение активного сопротивления стержня из-за отличия материала болтов от материала стержней;

- снижение сечения и изменение формы стержня в месте соединения.

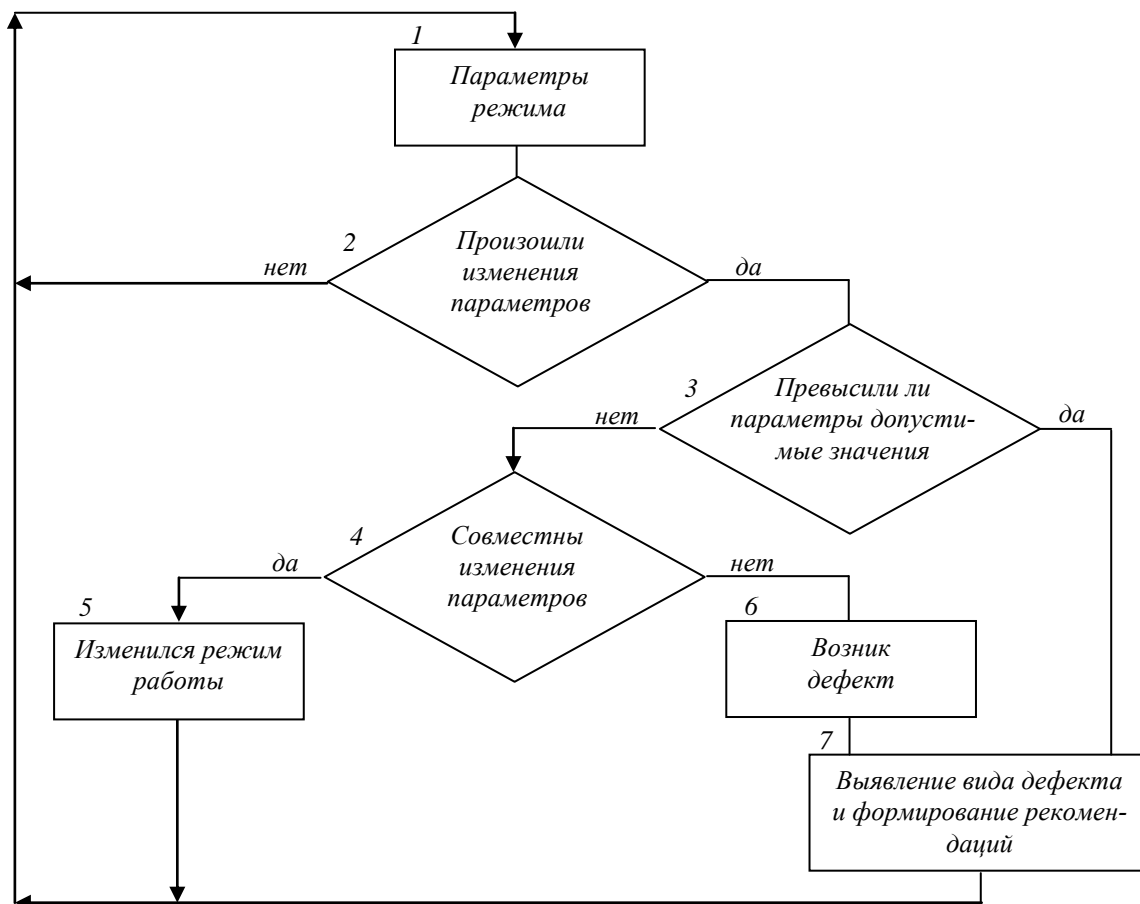


Рисунок 1 – Алгоритм пакетного диагностирования

Очевидно, что влияние указанных факторов на изменение режима работы двигателя после модернизации его ротора можно свести до минимума или пренебречь этим влиянием, если модернизировать всего 1-2 стержня. Но в опытном двигателе выполнен полный срез короткозамыкающих колец с двух сторон ротора и установлено по два болта в каждый стержень. Таким образом, общее количество болтов составило 84 штуки, что обусловило значительное изменение параметров ротора и режима работы АД.

Замена материала соединительных болтов с ферромагнитного (сталь) на неферромагнитный (медь) позволяет полностью устранить первый недостаток и частично – второй. Экспериментальные исследования показали, что при имитации обрывов стержней медными болтами распределение магнитного потока в воздушном зазоре и теле ротора ближе к реальному, что подтверждается в результате сравнения режимов пуска двигателя со стальными и медными болтами в качестве соединения в местах обрывов (рис.2). Время пуска и величина пускового тока опытного АД при использовании медных болтов имеют примерно такие же значения, что и до выполнения модернизации двигателя.

В ходе экспериментальных исследований установившихся режимов работы АД при обрыве стержней короткозамкну-

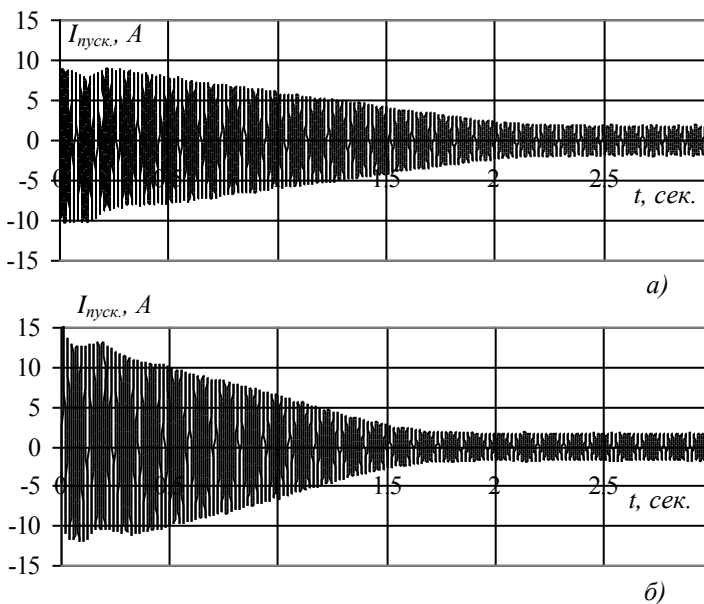


Рисунок 2 – Осциллограммы фазного тока опытного АД в режиме пуска: а) с болтами из ферромагнитного материала; б) с болтами из неферромагнитного материала

того ротора изменялась величина нагрузки на валу АД, а также число оборванных стержней.

В результате обработки экспериментальных данных с использованием разработанных алгоритмов, положенных в основу системы диагностики, получены зависимости величины тока обратной последовательности (ОП) I_2 (рис.3), отношения активной мощности на валу АД к скольжению P/S (рис.4) и третьей гармоники тока статора $I^{(3)}$ (рис.5) от количества оборванных стержней в обмотке короткозамкнутого ротора при различной величине нагрузки на валу двигателя.

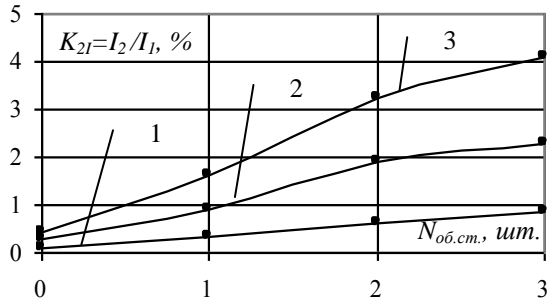


Рисунок 3 - Зависимость коэффициента ОП по току от количества оборванных стержней ротора $N_{об.ст.}$ при различной величине нагрузки на валу $P_{нагр}$: 1 - $P_{нагр}=0$; 2 - $P_{нагр}=0,5 P_{ном}$; 3 - $P_{нагр}=P_{ном}$

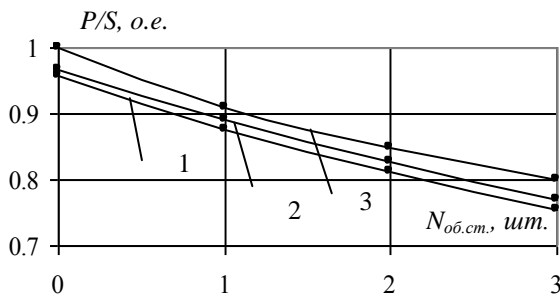


Рисунок 4 - Зависимость отношения P/S от количества оборванных стержней ротора $N_{об.ст.}$ при различной величине нагрузки на валу $P_{нагр}$: 1 - $P_{нагр}=0,2 P_{ном}$; 2 - $P_{нагр}=0,5 P_{ном}$; 3 - $P_{нагр}=P_{ном}$

При проведении экспериментальных исследований частота найденного тока ОП f_2 сопоставлялась с величиной, найденной по формуле (1).

Зависимость отношения величины активной мощности к величине скольжения двигателя P/S от числа оборванных стержней имеет больший наклон к оси ординат, чем зависимость относительного содержания тока ОП в фазных токах двигателя. Поэтому по снижению величины отношения P/S можно достоверно выявлять появление дефекта одного и более стержней обмотки ротора независимо от нагрузки двигателя. Необходимость непосредственного измерения или вычисления скольжения двигателя несколько усложняет использование этого параметра.

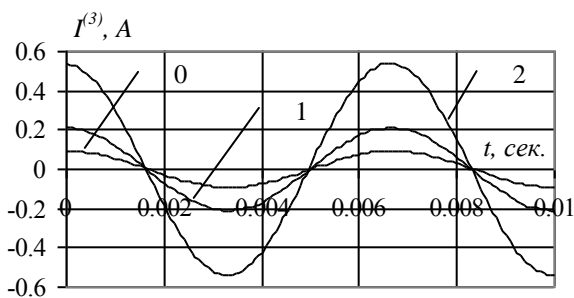


Рисунок 5 – Зависимость третьей гармоники тока статора АД $I^{(3)}$ от количества оборванных стержней КЗР (0, 1 и 2) при номинальной нагрузке АД

На основании анализа полученных зависимостей можно сделать следующие выводы. Если принять естественную несимметрию опытного двигателя при его номинальной нагрузке равную 0,5 % (ток ОП двигателя при отсутствии явных дефектов обмотки ротора) и коэффициент надежности отстройки равным 2, то обрыв одного стержня можно надежно выявить по увеличению тока ОП только при нагрузке двигателя не менее 50 % от номинальной. При отсутствии нагрузки по этому параметру можно выявить обрыв не менее трех стержней. В связи с этим для использования в качестве диагностического параметра величину тока ОП в системе диагностики ее критическое значение необходимо автоматически изменять в зависимости от величины полного тока. Анализ результатов расчетов для различных коэффициентов загрузки ($0,5 \div 1,0$) показал, что величина коэффициента ОП по току K_{2I} примерно прямо пропорциональна коэффициенту загрузки АД $K_{згр}$.

Величина тока ОП также зависит от величины несимметрии питающего напряжения и несимметрии фазных сопротивлений. Связь между несимметрией токов и напряжений не однозначна, зависит от параметров сети и двигателя, характера несимметрии их фазных сопротивлений и может быть определена на основании известных выражений [10] по результатам измерения величин фазных напряжений на секции в рабочем режиме АД и величины фазных сопротивлений АД во время проведения плановых ремонтов.

Частота тока ОП f_2 , вызванного обрывом стержней короткозамкнутого ротора АД, является функцией скольжения, и определяется по выражению [11]

$$f_2 = f_1(1 - 2S), \quad (1)$$

где f_1 – частота питающего напряжения.

Численный спектральный анализ на основе дискретного преобразования Фурье показал, что минимальное значение тока третьей гармоники в токе статора составляет около 1 % и почти не зависит от нагрузки двигателя. Превышение третьей гармоникой величины 1,3 % свидетельствует о появлении обрывов стержней обмотки ротора. Таким образом и этот параметр позволяет надежно выявлять обрывы стержней обмотки ротора.

На основании теории планирования эксперимента получены аналитические зависимости диагностических параметров. В качестве функции цели рассматривались коэффициент ОП по току K_{2I} (относительное содержание тока ОП в токе прямой последовательности) и отношение P/S . Независимыми друг от друга факторами были выбра-

ны величина нагрузки на валу АД $P_{нагр.}$, количество оборванных стержней $N_{об.ст.}$ и коэффициент ОП по напряжению K_{2U} , характеризующий несимметрию питающего напряжения. В табл.1 приведены средние и граничные уровни истинных и соответствующих им кодированных факторов для исследования зависимостей диагностических параметров.

Таблица 1 - Уровни истинных и кодированных факторов для исследования зависимостей диагностических параметров

Истинные факторы	$P_{нагр.}$ о.е.	$N_{ст.}$ шт.	K_{2U} , %
Кодированные факторы	X_1	X_2	X_3
Верхний уровень (+1)	1	2	2
Средний уровень (0)	0,5	1	1
Нижний уровень (-1)	0	0	0

Полученные полиномы имеют вид:

$$K_{2I} = 1,840 + 0,825P_{нагр} + 0,720N_{об.ст.} + 0,993K_{2U} + 0,158P_{нагр}^2 + 0,078N_{об.ст.}^2 + 0,066K_{2U}^2 + 0,561P_{нагр}N_{об.ст.} - 0,001P_{нагр}K_{2U};$$

$$P/S = 0,869 + 0,016P_{нагр} - 0,071N_{об.ст.} - 0,029K_{2U} + 0,003P_{нагр}^2 + 0,009N_{об.ст.}^2 + 0,005K_{2U}^2 - 0,002P_{нагр}N_{об.ст.} - 0,001P_{нагр}K_{2U} - 0,002N_{об.ст.}K_{2U}.$$

При помощи коэффициентов Стьюдента для вероятности, равной 0,95, найдены доверительные интервалы, величина которых не превышает $\pm 0,007$ для коэффициентов полинома K_{2I} , а для коэффициентов полинома P/S не превышает $\pm 0,0015$.

Для получения зависимостей параметров установившегося режима работы АД от количества замкнутых витков обмотки статора использовался опытный двигатель, у которого в фазе А обмотки статора выполнены и выведены несколько отпаек, что позволяет выполнять имитацию витковых замыканий.

На рис.6 приведены зависимости тока поврежденной фазы, тока замыкания и тока ОП от количества замкнувшихся витков обмотки статора при работе АД на холостом ходу. Замыкание небольшого числа витков приводит к незначительному увеличению тока в поврежденной фазе. Однако при этом ток, протекающий в замкнувшихся витках, имеет большую величину. Так, например, при замыкании 7 % витков ток в поврежденной фазе увеличился на 1,2 А, а ток замыкания составил 114,8 А. При этом ток ОП равен 1,2 А. Частота тока ОП при витком замыкании равна частоте питающего напряжения f_1 . Релейная защита не чувствительна к такому незначительному изменению фазного тока АД, особенно если АД работает с нагрузкой значительно ниже номинальной.

С помощью дискретного преобразования Фурье экспериментальных данных получена зависимость третьей гармоники тока статора $I^{(3)}$ от количества замкнувшихся витков фазы статора АД a . Результаты расчетов приведены в табл.2.

Таблица 2 – Зависимость третьей гармоники тока статора АД $I^{(3)}$ от количества замкнутых витков фазы статора a при работе АД без нагрузки

a , %	0	7	9	10	12	13	16	18
$I^{(3)}$, А	0,1	0,11	0,12	0,25	0,33	0,28	0,25	0,3

Как показали исследования, величины тока ОП и третьей гармоники тока статора зависят от месторасположения короткозамкнутых витков. Наибольшее их значение наблюдается при возникновении замыкания ближе к нулевым выводам обмотки статора, а наименьшее – при замыкании ближе к выводам АД.

Анализ результатов экспериментальных исследований витковых замыканий в обмотке статора показал, что по величине тока ОП можно надежно выявлять витковые замыкания в обмотке статора АД, начиная с не менее 3-5 % замкнувшихся витков. Это позволяет предотвратить дальнейшее развитие повреждения, однако при этом требуется высокое быстродействие системы диагностики и даже исполнение ею функций релейной защиты (отключение поврежденного присоединения). Величина третьей гармоники тока статора АД не является достаточно информативным параметром при малом количестве замкнувшихся витков.

Для оценки адекватности используемых при разработке системы диагностики электродвигателей физических и математических моделей проведено сопоставление результатов экспериментальных исследований и математического моделирования. Сравнение этих результатов позволяет сделать вывод, что отклонение величины коэффициента ОП по току K_{2I} не превышает 10,4 %, а отклонение отношения P/S – 6,8 %. Отклонение величины коэффициента ОП по току K_{2I} при витковых замыканиях в обмотке статора не превышает 10 %. По-

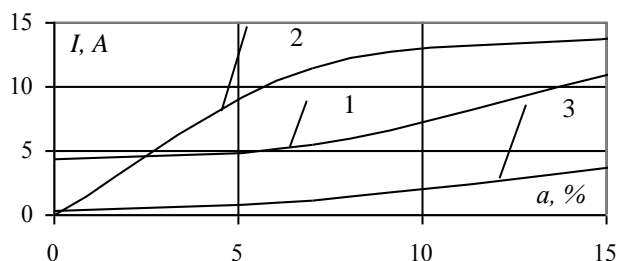


Рисунок 6 – Зависимость величины токов от количества замкнувшихся витков a , % при работе АД на холостом ходу: 1 – ток поврежденной фазы I_a ; 2 – ток замыкания $0, I_{зам.}$; 3 – ток ОП I_2 .

лученные результаты подтверждают достоверность используемых математических моделей, а также возможность построения принципов диагностики с их использованием.

ВЫВОДЫ

Основные виды дефектов, развивающиеся в процессе эксплуатации электродвигателей, могут выявляться в их установившихся рабочих режимах (т.е. без отключения электродвигателя) по изменению во времени величины тока обратной последовательности. Для этого дополнительно необходимо контролировать частоту тока обратной последовательности.

Для повышения достоверности постановки диагноза критическое значение тока обратной последовательности необходимо автоматически корректировать в зависимости от величины фазного тока.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сивокобыленко В.Ф., Гребченко Н.В., Нури Абделбассет. Автоматизация диагностики стержней короткозамкнутых роторов асинхронных двигателей собственных нужд электрических станций // Сборник научных трудов ДонГТУ. Серия: электротехника и энергетика, выпуск 2. – Донецк: ДонГТУ. – 1998. – С. 6-13.

2. Гребченко Н.В., Полковниченко Д.В. Автоматизация диагностирования технического состояния собственных нужд электрических станций // Сборник научных трудов ДонГТУ. Серия: электротехника и энергетика, выпуск 2. – Донецк: ДонГТУ. – 1998. – С. 30-33.

3. Полковниченко Д.В. Оперативная диагностика асинхронных электродвигателей собственных нужд ТЭС // Сборник научных трудов ДонГТУ. Серия: электротехника и энергетика, выпуск 4. – Донецк: ДонГТУ. – 1999. – С. 230-235.

4. Гребченко Н.В., Полковниченко Д.В. Определение диагностических параметров для системы диагностики повреждений роторов асинхронных двигателей // Книга за матеріалами п'ятої міжнародної науково-технічної конференції «Контроль і управління в складних системах» (КУСС-99). - Том 3. - м. Вінниця. - 1999. - Вінниця: «УНІВЕРСУМ-Вінниця». – 1999. - С. 243-247.

5. Гребченко Н.В., Полковниченко Д.В. Определение симметричных составляющих параметров рабочего режима для диагностики электродвигателей. Сбірник наукових праць IV Міжнародної наукової конференції «Ефективність та якість електропостачання промислових підприємств». – Маріуполь. – 2000. – С. 183-186.

6. Ляткер И.И., Мордкович А.Г., Несвижский А.М. Система непрерывного контроля и диагностики синхронных машин // Электротехника. – 1996. - № 3. - С. 44-47.

7. Шаломыгин М.В. Методика интеллектуализации систем мониторинга электрических машин // Энергетика и электрификация. – 1997. - № 3. – С. 41-44.

8. Гашимов М.А. Логические методы диагностики технического состояния электрических машин // Электричество. – 1999. - № 7. – С.20-26.

9. Нури Абделбассет. Диагностика короткозамкнутых роторов асинхронных электроприводов электротехнических комплексов: Дис... канд. техн. наук: 05.09.03. – Донецк, 1997. - 135 с.

10. Гимоян Г.Г. Релейная защита горных электроустановок. – М.: Недра, 1978. - 349 с.

11. Гашимов М.А., Аскеров Н.А. Выявление неисправности стержней ротора асинхронных электродвигателей // Электрические станции. – 1984. - № 8. - С. 60-66.

***EXPERIMENTAL RESEARCHES OF THE ESTABLISHED OPERATION
OF ASYNCHRONOUS ELECTRIC MOTORS AT PRESENCE IN THEM OF
IMPERFECTIONS***

Grebchenko N., Polkovnichenko D.