

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 steadyed activity of asynchronous motors, steadyed 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 gobed 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 стержни 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.

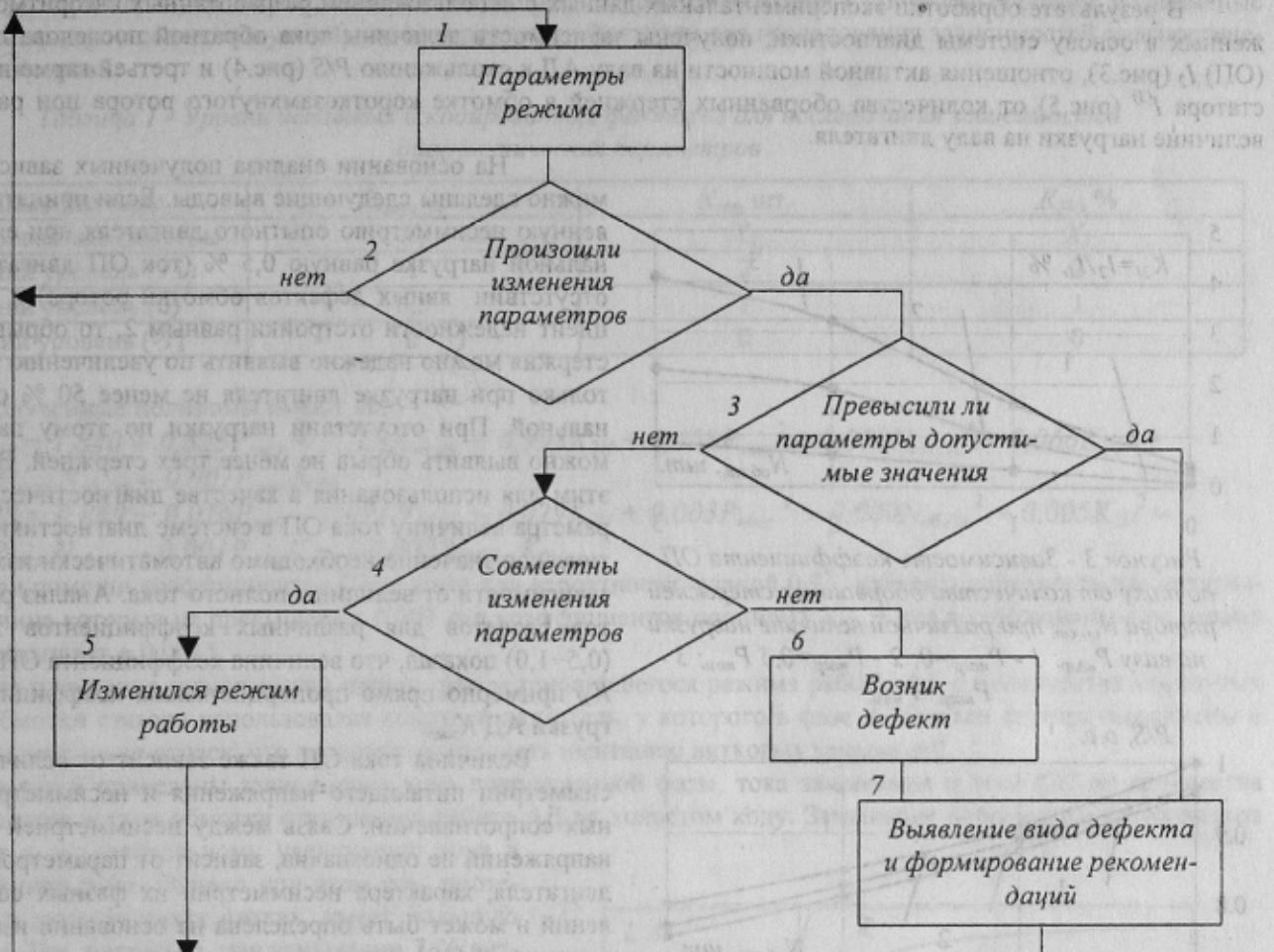


Рисунок 1 – Алгоритм пакетного диагностирования

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 (меди) 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-

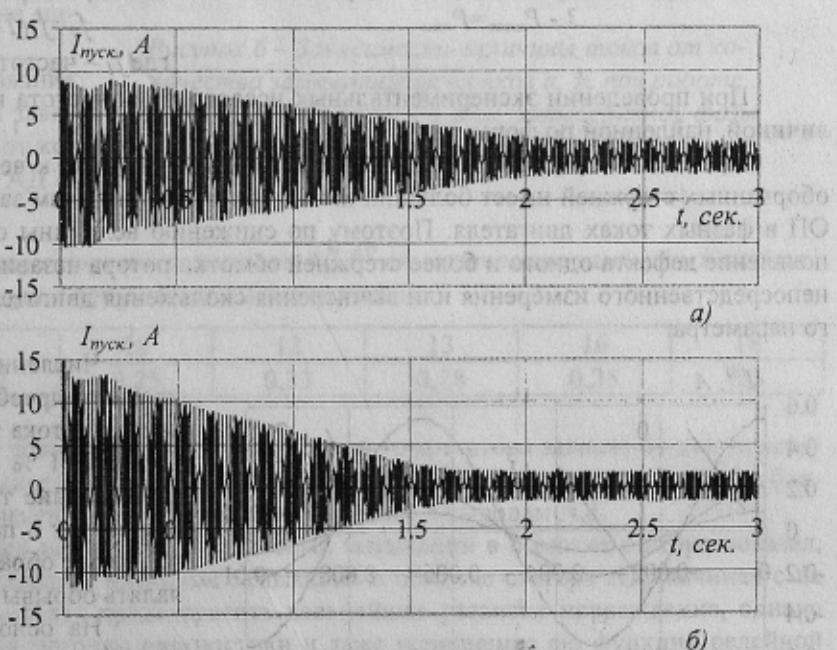


Рисунок 2 – Осциллограммы фазного тока опытного АД в режиме пуска: а) с болтами из ферромагнитного материала; б) с болтами из неферромагнитного материала

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.

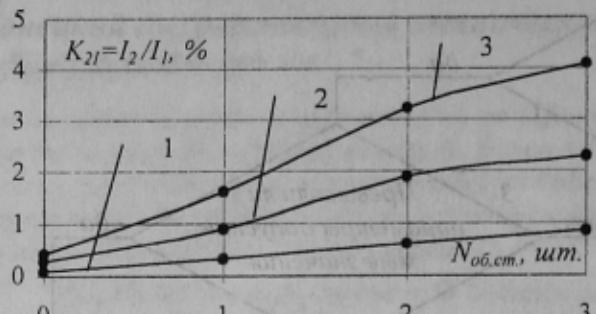


Рисунок 3 - Зависимость коэффициента ОП по току от количества оборванных стержней ротора $N_{\text{об.ст.}}$ при различной величине нагрузки на валу $P_{\text{нагр}}$: 1 - $P_{\text{нагр}}=0$; 2 - $P_{\text{нагр}}=0,5 P_{\text{ном}}$; 3 - $P_{\text{нагр}}=P_{\text{ном}}$

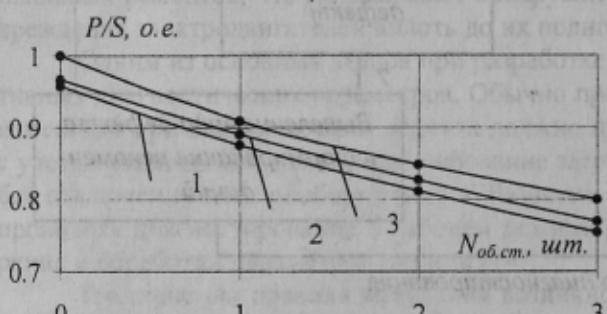


Рисунок 4 - Зависимость отношения P/S от количества оборванных стержней ротора $N_{\text{об.ст.}}$ при различной величине нагрузки на валу $P_{\text{нагр}}$: 1 - $P_{\text{нагр}}=0,2 P_{\text{ном}}$; 2 - $P_{\text{нагр}}=0,5 P_{\text{ном}}$; 3 - $P_{\text{нагр}}=P_{\text{ном}}$

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.

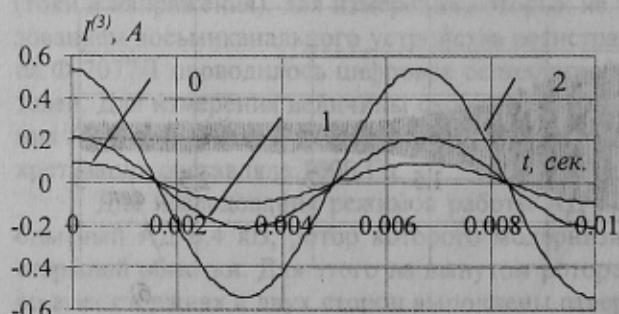


Рисунок 5 - Зависимость третьей гармоники тока статора АД $I^{(3)}$ от количества оборванных стержней $K_{\text{ЗР}}$ (0, 1 и 2) при номинальной нагрузке АД

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÷1,0) показал, что величина коэффициента ОП по току K_{2I} примерно прямо пропорциональна коэффициенту загрузки АД $K_{\text{загр}}$.

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 гармоники 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 выбраны

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:

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

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

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

Для получения зависимостей параметров установленного режима работы АД от количества замкнутых витков обмотки статора использовался опытный двигатель, у которого в фазе A 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
$I^{(3)}, A$	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 выполнение 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 вели-

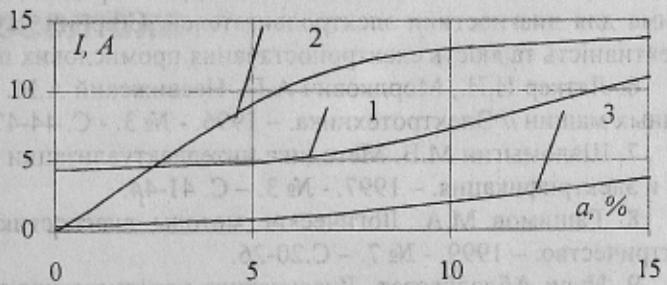


Рисунок 6 – Зависимость величины токов от количества замкнувшихся витков $a, \%$ при работе АД на холостом ходу: 1 – ток поврежденной фазы I_1 ; 2 – ток замыкания $0,11_{зам}$; 3 – ток ОП I_2 .

чины коэффициента ОП по току K_2 , не превышает 10,4 %, а отклонение отношения $P/S - 6,8 \%$. Отклонение величины коэффициента ОП по току K_2 при витковых замыканиях в обмотке статора не превышает 10 %. Полученные 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 и 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.

81	10	11	E1	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180	181	182	183	184	185	186	187	188	189	190	191	192	193	194	195	196	197	198	199	200	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210	211	212	213	214	215	216	217	218	219	220	221	222	223	224	225	226	227	228	229	230	231	232	233	234	235	236	237	238	239	240	241	242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253	254	255	256	257	258	259	260	261	262	263	264	265	266	267	268	269	270	271	272	273	274	275	276	277	278	279	280	281	282	283	284	285	286	287	288	289	290	291	292	293	294	295	296	297	298	299	300	301	302	303	304	305	306	307	308	309	310	311	312	313	314	315	316	317	318	319	320	321	322	323	324	325	326	327	328	329	330	331	332	333	334	335	336	337	338	339	340	341	342	343	344	345	346	347	348	349	350	351	352	353	354	355	356	357	358	359	360	361	362	363	364	365	366	367	368	369	370	371	372	373	374	375	376	377	378	379	380	381	382	383	384	385	386	387	388	389	390	391	392	393	394	395	396	397	398	399	400	401	402	403	404	405	406	407	408	409	410	411	412	413	414	415	416	417	418	419	420	421	422	423	424	425	426	427	428	429	430	431	432	433	434	435	436	437	438	439	440	441	442	443	444	445	446	447	448	449	450	451	452	453	454	455	456	457	458	459	460	461	462	463	464	465	466	467	468	469	470	471	472	473	474	475	476	477	478	479	480	481	482	483	484	485	486	487	488	489	490	491	492	493	494	495	496	497	498	499	500	501	502	503	504	505	506	507	508	509	510	511	512	513	514	515	516	517	518	519	520	521	522	523	524	525	526	527	528	529	530	531	532	533	534	535	536	537	538	539	540	541	542	543	544	545	546	547	548	549	550	551	552	553	554	555	556	557	558	559	560	561	562	563	564	565	566	567	568	569	570	571	572	573	574	575	576	577	578	579	580	581	582	583	584	585	586	587	588	589	590	591	592	593	594	595	596	597	598	599	600	601	602	603	604	605	606	607	608	609	610	611	612	613	614	615	616	617	618	619	620	621	622	623	624	625	626	627	628	629	630	631	632	633	634	635	636	637	638	639	640	641	642	643	644	645	646	647	648	649	650	651	652	653	654	655	656	657	658	659	660	661	662	663	664	665	666	667	668	669	660	661	662	663	664	665	666	667	668	669	670	671	672	673	674	675	676	677	678	679	680	681	682	683	684	685	686	687	688	689	690	691	692	693	694	695	696	697	698	699	700	701	702	703	704	705	706	707	708	709	710	711	712	713	714	715	716	717	718	719	720	721	722	723	724	725	726	727	728	729	730	731	732	733	734	735	736	737	738	739	740	741	742	743	744	745	746	747	748	749	750	751	752	753	754	755	756	757	758	759	760	761	762	763	764	765	766	767	768	769	770	771	772	773	774	775	776	777	778	779	770	771	772	773	774	775	776	777	778	779	780	781	782	783	784	785	786	787	788	789	790	791	792	793	794	795	796	797	798	799	800	801	802	803	804	805	806	807	808	809	810	811	812	813	814	815	816	817	818	819	820	821	822	823	824	825	826	827	828	829	830	831	832	833	834	835	836	837	838	839	840	841	842	843	844	845	846	847	848	849	850	851	852	853	854	855	856	857	858	859	860	861	862	863	864	865	866	867	868	869	870	871	872	873	874	875	876	877	878	879	880	881	882	883	884	885	886	887	888	889	890	891	892	893	894	895	896	897	898	899	900	901	902	903	904	905	906	907	908	909	910	911	912	913	914	915	916	917	918	919	920	921	922	923	924	925	926	927	928	929	930	931	932	933	934	935	936	937	938	939	940	941	942	943	944	945	946	947	948	949	950	951	952	953	954	955	956	957	958	959	960	961	962	963	964	965	966	967	968	969	970	971	972	973	974	975	976	977	978	979	980	981	982	983	984	985	986	987	988	989	990	991	992	993	994	995	996	997	998	999	1000	1001	1002	1003	1004	1005	1006	1007	1008	1009	10010	10011	10012	10013	10014	10015	10016	10017	10018	10019	10020	10021	10022	10023	10024	10025	10026	10027	10028	10029	10030	10031	10032	10033	10034	10035	10036	10037	10038	10039	10040	10041	10042	10043	10044	10045	10046	10047	10048	10049	10050	10051	10052	10053	10054	10055	10056	10057	10058	10059	10060	10061	10062	10063	10064	10065	10066	10067	10068	10069	10070	10071	10072	10073	10074	10075	10076	10077	10078	10079	10080	10081	10082	10083	10084	10085	10086	10087	10088	10089	10090	10091	10092	10093	10094	10095	10096	10097	10098	10099	100100	100101	100102	100103	100104	100105	100106	100107	100108	100109	100110	100111	100112	100113	100114	100115	100116	100117	100118	100119	100120	100121	100122	100123	100124	100125	100126	100127	100128	100129	100130	100131	100132	100133	100134	100135	100136	100137	100138	100139	100140	100141	100142	100143	100144	100145	100146	100147	100148	100149	100150	100151	100152	100153	100154	100155	100156	100157	100158	100159	100160	100161	100162	100163	100164	100165	100166	100167	100168	100169	100170	1001