

*А.В.Булычев, д.т.н., профессор Вологодского государственного технического университета
В.Г.Езерский, технический директор НТЦ «Механотроника»
О.Г.Захаров, заведующий лабораторией НТЦ «Механотроника»
Н.Д.Поздеев, к.т.н., доцент Вологодского государственного технического университета*

Исследование цифровых устройств защиты электродвигателей серии **БМРЗ-Д на физической модели.**

В действующих ПУЭ установлен перечень защит, которыми в обязательном порядке должны быть оснащены электродвигатели напряжением свыше 1 кВ [1, глава 5.3]:

- защита от многофазных замыканий:

а) токовая отсечка без выдержки времени - для двигателей мощностью менее

2 МВт;

б) токовая отсечка без выдержки времени - для двигателей мощностью 2

МВт

и более, оснащенных защитой от однофазных замыканий на землю, действующей на отключение;

в) токовая отсечка – для двигателей мощностью 5 МВт и больше у которых менее шести выводов обмотки статора.

- защита от однофазных замыканий на землю **ОЗЗ**;

- защита от перегрузки;

- защита минимального напряжения, в том числе с переключением на низшую частоту вращения;

- продольная дифференциальная токовая защита – для двигателей мощностью 5 МВт и более, а также для двигателей мощностью менее 5 МВт, если токовые отсечки не обеспечивают требования чувствительности;

- защита от асинхронного режима – для синхронных электродвигателей;

В устройствах серии **БМРЗ**, выпускаемых НТЦ «Механотроника» (С-Петербург), предусмотрены как защиты, рекомендованные ПУЭ, так и оригинальные защиты [2]:

- защита от заклинивания ротора;

- защита от обрыва фазы;

- дифференциальная защита по сумме фазных токов и току нейтрали (REF-дифференциал);

- дифференциальная защита с торможением;

- дифференциальная токовая отсечка;

- защита от перегрева на основе тепловой модели двигателя с запретом пуска перегретого двигателя;

- трехступенчатая максимальная токовая защита **МТЗ**;

При подключении электродвигателей к распределительному устройству длинным кабелем помимо перечисленных выше защит необходимо обеспечить [3]:

- дальнейшее резервирование при отказах защит и выключателей;

- блокирование МТЗ при пусках и самозапущах электродвигателей

- минимальная токовая защита и др.

В большинстве случаев двигатели 6(10) кВ применяются для привода насосов, транспортеров, компрессоров, вентиляторов, воздуходувок и т.п. Неравномерная нагрузка и часто изменяющиеся режимы работы двигателей, а также повреждения приводимых механизмов вызывают:

- повышенный нагрев двигателя при пусках;

- заклинивание ротора;

- затянутый пуск;

- колебания нагрузки (для компрессоров и насосов – помпаж);

- обрыв нагрузки и т.д.

Появление цифровой техники в РЗА позволило существенно улучшить характеристики защит, рекомендованных ПУЭ, а также реализовать новые функции защиты и автоматики, позволяющие предупреждать повреждения электродвигателей при нарушении технологических режимов.

Цифровые устройства **БМРЗ** для защиты двигателей выпускаются уже около 10 лет, каждое изделие проходит приемосдаточные испытания, а раз в два года проводятся периодические испытания. Устройства эксплуатируются на разнообразных объектах и о

надежной и правильной их работе получены многочисленные отзывы потребителей. Однако известно, что эксплуатационные испытания дают в основном качественную оценку работы (хорошо-плохо). Поэтому для достоверной и объективной оценки качества выполнения цифровыми устройствами функций РЗА и проверки рекомендуемых методов расчета уставок [4] необходим не только более длительный период эксплуатации, но и искусственное создание аварийных условий, воспроизведение которых в условиях реального объекта невозможно или связано со значительными затратами и рисками.

Учитывая это, было принято решение о проведении специальных испытаний двух исполнений устройств этой серии - БМРЗ-ДД-04 и БМРЗ-ДА-31 [5] на электродинамической физической модели (рис.1). Такие испытания позволили провести дополнительную оценку качества выполнения устройствами своих функций при создании всех необходимых аварийных и экстремальных режимов работы.

Электродинамическая физическая модель для испытаний устройств **БМРЗ** была создана на кафедре «Электроснабжение» Вологодского государственного технического университета на основе трехфазного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором типа АИР100S4 [6].

Эквивалентом механической нагрузки асинхронного электродвигателя M служила электрическая машина постоянного тока G с параллельным возбуждением ПБСТ-52 мощностью 4,1 кВт. Различные нагрузочные режимы работы электродвигателя задавались изменением тока якоря и тока возбуждения машины постоянного тока. Характеристики машин и электрических аппаратов, использованных в физической модели, приведены в отчете [7].

Оценка важнейших свойств исследуемых блоков серии **БМРЗ-Д** производилась в соответствии с общепринятыми критериями технического совершенства и надежности функционирования [8] при уставках, рассчитанных по методикам, рекомендованным изготовителем блоков [9].

Измерение и регистрация контролируемых сигналов, поступающих от трансформаторных преобразователей ток-напряжение и напряжение-напряжение, производились внешним компьютерным регистратором в цифровом виде с помощью многоканального блока аналого-цифровых преобразователей L-761 производства ЗАО «Л-Кард».

Датчиками температуры лобовых частей обмотки статора и корпуса двигателя служили терморезисторы с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления (ТКС) типа ММТ-1, включенные в мостовые измерительные схемы.

На физической модели исследовались различные режимы работы блоков серии **БМРЗ-Д**, в частности:

- пуск электродвигателя в нормальных условиях работы при номинальном значении напряжении питания (рис. 2, а);
- пуск электродвигателя при пониженном напряжении;
- пуск электродвигателя, нагруженного номинальной механической нагрузкой;
- пуск электродвигателя при пониженной частоте питающего напряжения и др.

Измерения при испытаниях показали, что пусковые токи контролируемого электродвигателя при любых условиях пуска меньше тока срабатывания токовых отсечек **БМРЗ** (отсечки отстроены по току от пусковых режимов), поэтому отсечки не срабатывали. Токи небаланса в дифференциальных защитах во всех режимах пуска не превысили уставки дифференциальных защит и они также не срабатывали.

Максимальные токовые защиты **МТЗ** по своему принципу действия могут иметь токи срабатывания меньше пусковых токов, но эти защиты были отстроены от пусковых режимов за счет выдержек времени срабатывания. Максимальные токовые защиты исследуемых БМРЗ во всех перечисленных переходных режимах не срабатывали.

Аналогичные испытания проводились и в условиях самозапуска электродвигателя (рис.2, б) при различных продолжительностях перерывов питания от 0,1 с до 5 с. После восстановления питания обеспечивался пуск контролируемого электродвигателя, а защиты исследуемых блоков не срабатывали.

Испытания в режимах пуска и самозапуска электродвигателя подтвердили, что защиты БМРЗ-ДД-04 и БМРЗ-ДА-31 обладают достаточной и устойчивой отстроенностью от возмущений в нормальных режимах работы контролируемого электродвигателя. При исследованиях устройств серии **БМРЗ-Д** на модели были реализованы наиболее вероятные и опасные внутренние повреждения электродвигателя [10]. Для моделирования витковых замыканий в обмотке одной из фаз электродвигателя было выполнено 6 отводов (рис. 3).

На одну пару полюсов в каждой фазе двигателя приходится одна секция, состоящая из трех катушек с 36 витками. Координаты отпаек:

- K_1 – 26-ой виток первой катушки;
- K_2 – 36-ой виток (конец первой катушки);
- K_3 – 72-ой виток (конец второй катушки);
- K_4 – 108-ой виток (конец третьей катушки);
- K_5 – 144-ый виток (конец четвертой катушки);
- K_6 – 180-ый виток (конец пятой катушки).

Для выявления трехфазных и двухфазных коротких замыканий на выводах и в обмотке статора электродвигателя в блоках **БМРЗ-Д** предусмотрены дифференциальные защиты и токовые отсечки.

Наиболее быстродействующим является алгоритм дифференциальной токовой отсечки **ДТО** в блоке БМРЗ-ДД-04. Так, при моделировании внутреннего междуфазного короткого замыкания и уставке по току, равной 2,1 номинального тока электродвигателя, **ДТО** срабатывает за время не более 0,1 с. На рис. 4, а показана осциллограмма токов при двухфазном коротком замыкании на выводах электродвигателя. Форма токов значительно отличается от синусоидальной, а максимальные мгновенные значения превышают номинальные в 30 раз и достигают 280 А.

Для выявления витковых замыканий в обмотке одной фазы в блоках серии **БМРЗ-Д** предусмотрены защита от несимметричных режимов и **МТЗ**. На рис.4, б показаны токи, возникающие в обмотке статора при замыкании 16% витков обмотки одной фазы со стороны нейтрали (замыкание на нейтраль шестой, ближайшей к ней, отпаек обмотки фазы С). В этом случае ток в поврежденной фазе С превысил номинальный, примерно, в 3 раза. При замыкании 88% витков обмотки фазы С (замыкание на нейтраль первой, ближайшей к фазному выводу, отпаек обмотки фазы С) ток в поврежденной фазе С превысил номинальный в 10 раз (рис. 5, а), а наибольшие мгновенные значения достигли, соответственно, 25А и 100А. В каждом из рассмотренных случаев в блоках серии **БМРЗ-Д** срабатывали защиты от несимметричных режимов и **МТЗ**, а поврежденный электродвигатель *М* отключался от сети за время не более 0,2 с.

В результате испытаний при моделировании многочисленных и разнообразных внутренних коротких замыканий электродвигателя *М* установлено, что защиты в блоках БМРЗ-ДД-04 и БМРЗ-ДА-31 срабатывают селективно и устойчиво при всех моделировавшихся междуфазных и витковых замыканиях в обмотке статора. Зона нечувствительности блоков **БМРЗ-Д** при витковых замыканиях в обмотке одной фазы составляет не более 16% витков обмотки, что вполне согласуется с требованиями ПУЭ [1] к защитах машин на которых невозможна установка поперечной дифференциальной защиты.

Для моделирования заклинивания ротора асинхронного электродвигателя в установке использован колодочный электрогидравлический тормоз типа ТКГ-200, создающий тормозной момент 300 Н·м. Колодки тормоза прижимаются к специальной муфте, которая, обеспечивает передачу крутящего момента от электродвигателя к машине постоянного тока.

В блоках предусмотрено два варианта работы защиты от заклинивания ротора. Первый вариант работы защиты электродвигателя (формирование блоком команды на отключение выключателя, через который подается питание на электродвигатель) выбирается в том случае, если недопустима работа сети или электродвигателя в этом режиме. Вторым вариантом работы защиты электродвигателя (формирование блоком сигнала, оповещающего о заклинивании ротора) выбирается в том случае, когда экстренное прекращение режима работы не требуется, а решение об отключении выключателя принимает персонал. Выбор одного из двух вариантов производится оператором при настройке блока.

Испытания защиты от заклинивания ротора производились в следующей последовательности:

1. Пуск электродвигателя при номинальном напряжении питания с номинальной нагрузкой;
2. Работа электродвигателя в стационарном режиме в течение 6 минут;
3. Заклинивание вращающегося ротора колодочным тормозом.

На осциллограмме (рис. 5, б) зафиксирован характер изменения тока при заклинивании двигателя. Время срабатывания защиты составило 0,6 с.

Для выявления перегрузки контролируемых электродвигателей в исследуемых блоках предусмотрены:

- МТЗ с зависимой и/или независимой характеристиками;

- тепловая модель контролируемого электродвигателя.

Проверка работы МТЗ при нагрузках от 1,2 до 2 номинальной подтвердили паспортные характеристики защиты. Отклонение реального времени срабатывания МТЗ от заданного значения не превысило 5%.

В соответствии с программой исследований произведено сравнение реального процесса нагревания физической модели и процесса нагревания, реализованного в математической модели. Сравнение показало, что используемая в блоках модель нагревания электродвигателя с достаточной для практических целей точностью воспроизводит реальный процесс нагревания и охлаждения электродвигателя.

При использовании тепловой модели необходимо предварительно определить и ввести в блок ряд параметров:

- номинальный ток статора;
- постоянную времени нагревания электродвигателя;
- постоянную времени охлаждения электродвигателя.

Два последних параметра трудно определить расчетным путем. Поэтому для их оценки целесообразно использовать экспериментальные данные о нагреве и охлаждении контролируемых машин в реальных условиях эксплуатации [10, 11].

На рис. 6, а показаны кривые нагревания для:

- физической модели электродвигателя (*кривая 2* получена путем измерений);
- математической модели, используемой в БМРЗ (*кривые 1 и 3*).

Кривая 1 получена в блоках серии **БМРЗ-Д** при тепловых параметрах, которые определены экспериментальным путем и откорректированы методами интерполяции, а кривая 3 – при параметрах, которые определены путем расчетов по паспортным данным физической модели. Как видно, параметры тепловой модели в блоках серии **БМРЗ-Д** можно подобрать так, что будет обеспечиваться достаточно точное ее функционирование с погрешностями не более 10% (*кривые 1 и 2*), что вполне приемлемо для средств релейной защиты.

В блоке БМРЗ-ДД-04 предусмотрена специальная дифференциальная защита, предназначенная для выявления однофазных замыканий на землю в обмотках статора электродвигателя, работающего в сети с заземленной нейтралью. Входными сигналами для этой защиты служат сумма фазных токов и ток в нейтрали контролируемого электродвигателя (так называемый REF – дифференциал или REF - защита).

В процессе испытаний установлено, что при уставке, равной 0,5А вторичного тока эта защита выявляет однофазные замыкания на землю при повреждениях в фазных обмотках не менее 16% витков (рис. 6, б). Осциллограммы, приведенные на этом рисунке, показывают, что при замыкание шестой, ближайшей к нейтрали, отпайки на землю ток в поврежденной фазе превышает номинальный примерно, в 1,6 раза, а максимальное амплитудное значение достигает 16А.

По результатам испытаний можно сделать вывод, REF – защита имеет высокую чувствительность и достаточную степень селективности, обеспечивая устойчивое функционирование при внутренних повреждениях обмоток электродвигателя.

ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Проведены всесторонние исследования цифровых защит электродвигателей БМРЗ-ДД-04 и БМРЗ-ДА-31 на электродинамической физической модели асинхронного электродвигателя в переходных режимах. Результаты исследования подтвердили достаточную полноту свойств, характеризующих техническое совершенство исследованных БМРЗ, их основные характеристики и правомерность принятых при разработке этих защит математических моделей контролируемых объектов.

2. Создана электродинамическая физическая модель асинхронного электродвигателя для исследования цифровых защит электродвигателей в условиях реальных переходных процессов. Разработаны и апробированы методы исследований защит в условиях, максимально приближенных к реальным.

3. Создан банк сигналов (данных), полученных при исследовании защит электродвигателей на электродинамической физической модели электродвигателя в нормальных и аварийных переходных режимах при повреждениях. Зарегистрированные в формате Comtrade сигналы могут быть многократно использованы при исследованиях защит с применением воспроизводящей аппаратуры типа РЕТОМ.

4. Результаты испытаний на физической модели показали, что блоки серии БМРЗ-Д обладают всеми необходимыми свойствами защит электродвигателей.

5. Реализованы рекомендации по усовершенствованию некоторых алгоритмов защит и методик расчета уставок для блоков серии БМРЗ-Д.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила устройства электроустановок. М.: Главгосэнергонадзор России, 1998, 588 с.
2. *Езерский В.Г.* Функции релейной защиты для предупреждения повреждений электродвигателей// «Энергия и менеджмент», ноябрь-декабрь, 2002, с. 45
3. *Беляев А.В., Эдлин М.А.* Дальнее резервирование отказов защит и выключателей в сетях 0,4 кВ//Электрические станции № 12, 2002, с. 51
4. *Александров А.М.* Выбор уставок защит асинхронных электродвигателей выше 1 кВ. СПб. ПЭИПк, 1996
5. Цифровые устройства релейной защиты. Каталог продукции 2004. СПб, НТЦ «Механотроника», 2004, 190 с.
6. *Веников В.А.* Теория подобия и моделирование.- М.: Высшая школа, 1966, 488 с.
7. Исследование поведения микропроцессорной защиты электродвигателей в условиях переходных процессов контролируемом объекте.// Отчет по НИР., Вологодский государственный технический университет, 2005 г., 188 с.
8. *Федосеев А. М.* Релейная защита электрических систем. М.: Энергия, 1976, 560 с.
9. Блок микропроцессорный релейной защиты БМРЗ. Руководство по эксплуатации. ДИВГ.648228.001 РЭ. СПб, НТЦ «Механотроника», 2005 г, 138 с.
10. *Корогодский В. И.* Релейная защита электродвигателей напряжением выше 1 кВ / В. И. Корогодский, С. Л. Кужеков, Л. Б. Паперно. - М.: Энергоатомиздат, 1987. - 248 с.
11. *Захаров О.Г., Фрейцис И.И.* Метод определения коэффициента загрузки асинхронного электродвигателя// Вопросы судостроения, серия Судовая электротехника и связь, 1985, вып. 42. С. 78
12. *Захаров О.Г., Фрейцис И.И.* Энергосберегающий метод испытания на нагревание судового электрооборудования//Вопросы судостроения, серия Промышленная энергетика, 1983. Вып.12. С.20.

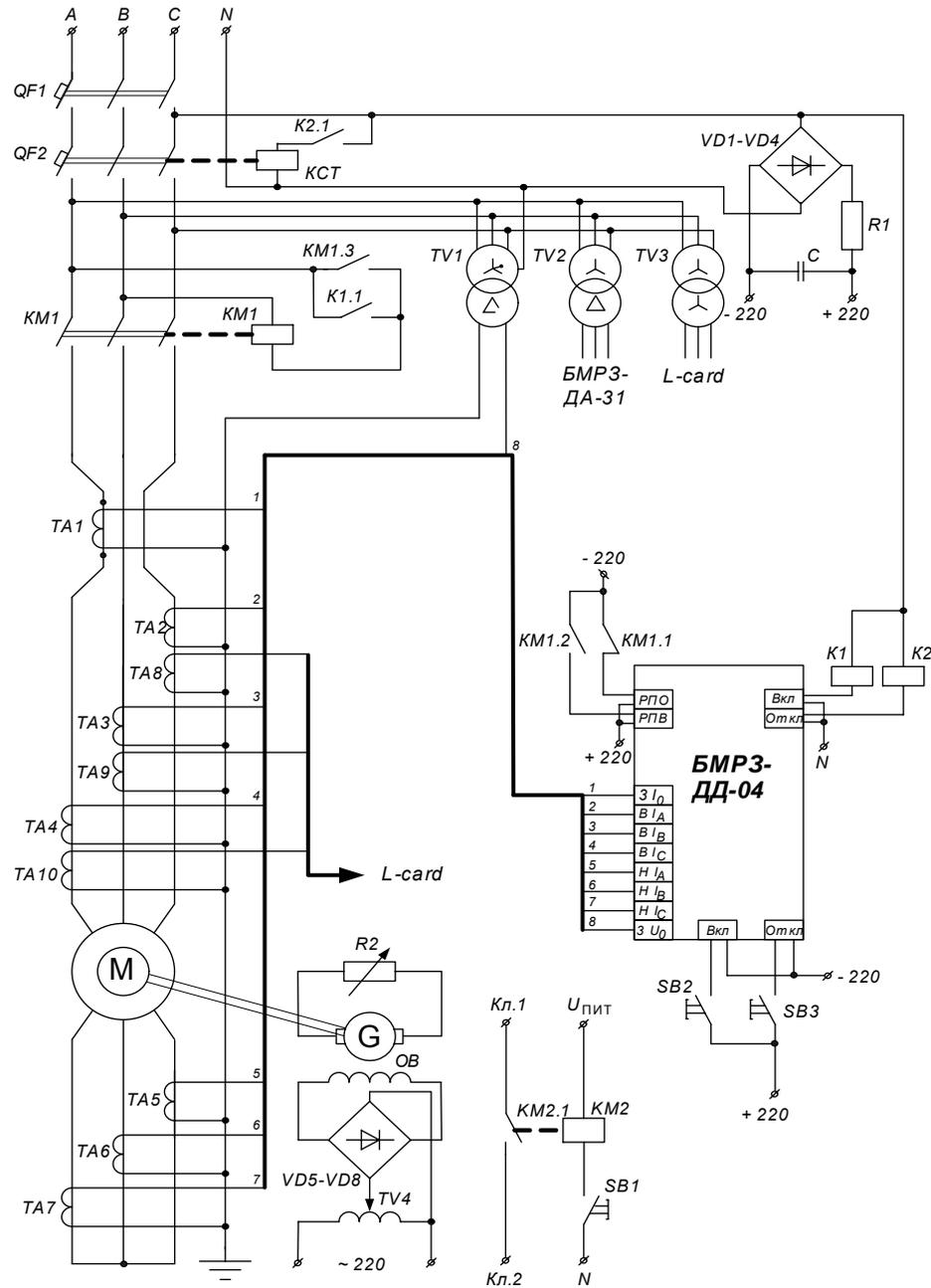


Рис.1. Схема установки для испытаний микропроцессорных устройств серии **БМРЗ-Д**

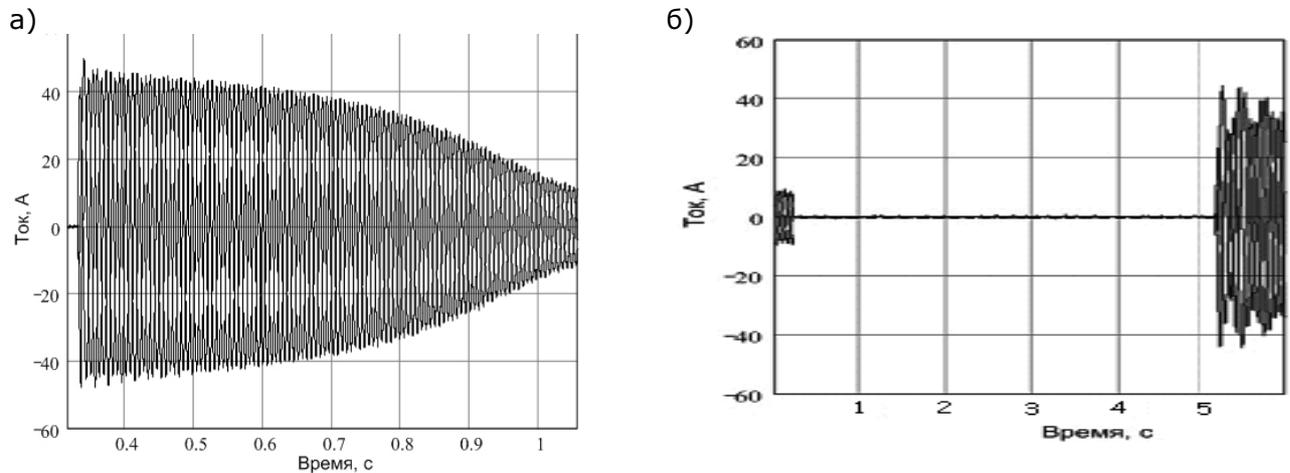


Рис. 2. Осциллограмма токов электродвигателя при **пуске** в номинальном режиме (а) и **самозапуске** (б).

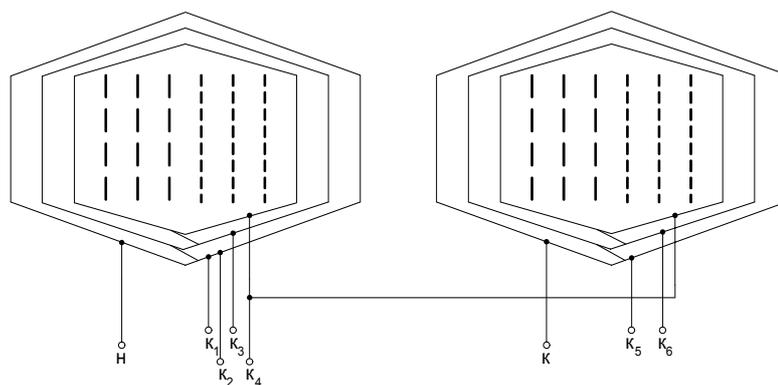


Рис. 3. Схема расположения выводов в обмотке электродвигателя для моделирования коротких замыканий.

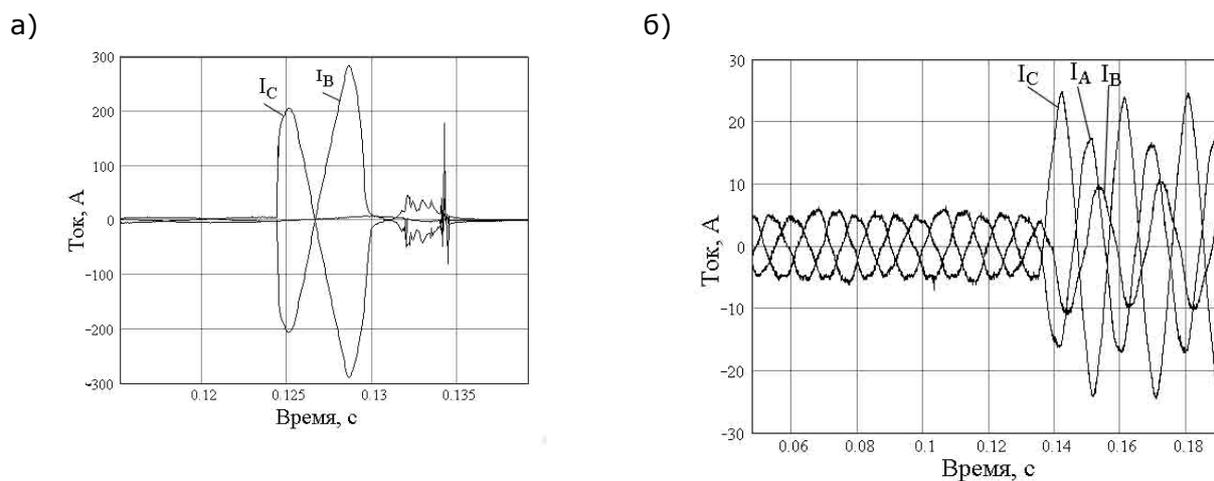


Рис. 4. Осциллограммы токов при междуфазном коротком замыкании (а) и замыкании 16% витков обмотки одной фазы

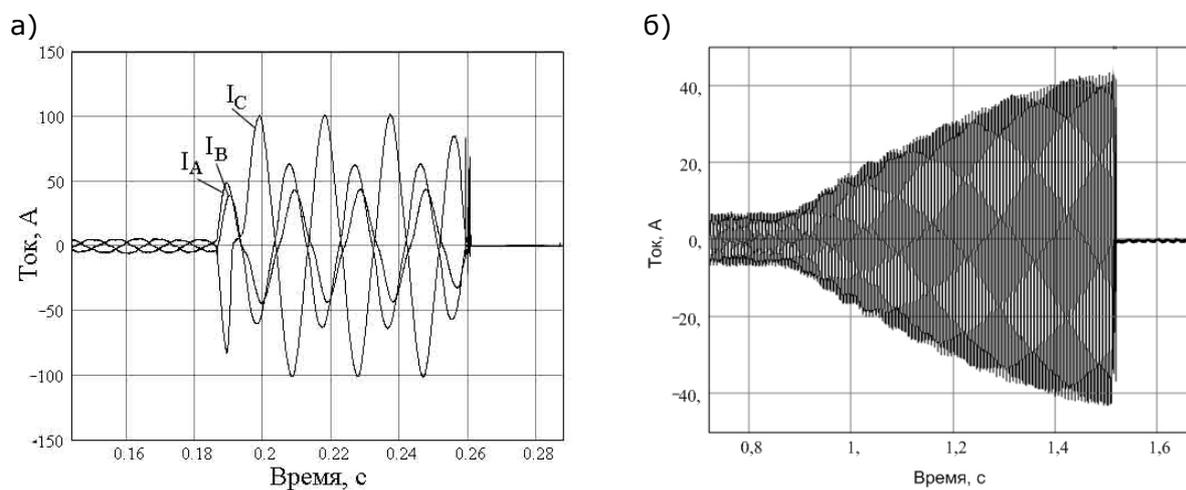


Рис.5. Осциллограмма токов электродвигателя при замыкании 88% витков обмотки одной фазы (а) и заклинивании ротора (б) электродвигателя

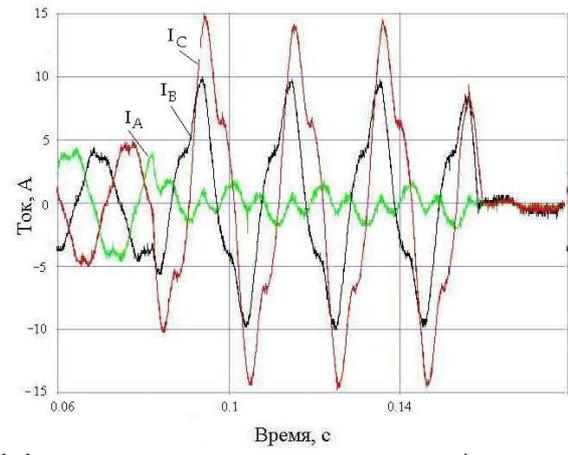
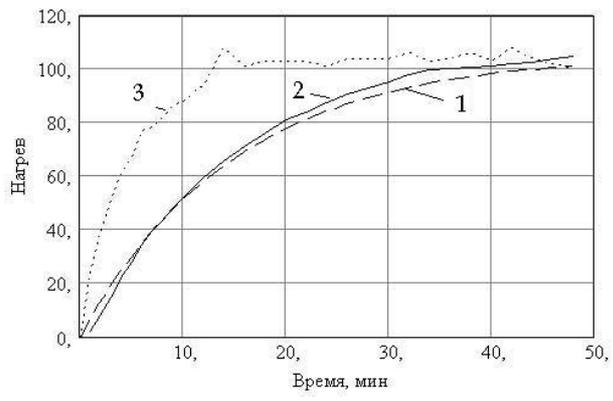


Рис.6. Кривые нагрева электродвигателя (а) и осциллограмма изменения фазных токов при замыкании на землю (б)