

3. *Белецкий Е. Н.* Учет физико-механических характеристик композиционных углепластиков, влияющих на процессы разрушения при реализации технологического процесса механической обработки и экстремальных условий эксплуатации / Е. Н. Белецкий, С. Н. Безпальчук, В. М. Петров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 2(24).

4. *Петров В. М.* Модель разрушения композиционных углепластиков при обработке лезвийным инструментом: Международная научно-практической конференция «Прогрессивные технологии обработки материалов, режущий инструмент и оснастка», 18–20 декабря 2002 г./ В. М. Петров // Инструмент и технологии. — 2002. — № 9–10. — С. 23–30.

5. *Капустин И. И.* Режущий инструмент кожевенно-обувной промышленности / И. И. Капустин, П. И. Буров // Сборник трудов ЦНИКП. — 1950. — № 16. — С. 8–14.

6. *Кузнецов В. Д.* Физика твердого тела. — Т. 3. / В. Д. Кузнецов. — Томск: Красное знамя, 1944. — С. 742.

7. *Томленов А. Д.* Теория пластического деформирования металлов / А. Д. Томленов. — М.: Металлургия, 1972. — С. 408.

8. *Тонсен Э.* Механика пластических деформаций при обработке металлов / Э. Тонсен, Ч. Янг, Ш. Кобаяши. — М.: Машиностроение, 1969. — С. 504.

9. *Белецкий Е. Н.* Изменение физико-механических показателей композиционного углепластика разной структуры при его разрушении резанием / Е. Н. Белецкий, С. Н. Безпальчук, О. А. Иванов, В. М. Петров // Инструмент и технологии. — 2007. — № 26–27. — С. 87–91.

10. *Белецкий Е. Н.* Реологические модели, используемые при моделировании процессов резания антифрикционных углепластиков, применяемых в энергомашиностроении / Е. Н. Белецкий // Инструмент и технологии. — 2009. — № 32. — С. 180–185.

УДК 621.313

А. А. Марченко,
ст. преподаватель,
ФГБОУ ВПО «КамчатГТУ»;

Н. Н. Портнягин,
д-р тех. наук,
ФГБОУ ВПО «КамчатГТУ»

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЕ НАГРУЖЕНИЕ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ В ПРОЦЕССЕ ПОСЛЕРЕМОНТНЫХ ИСПЫТАНИЙ

POWER EFFECTIVE LOADING OF ASYNCHRONOUS ELECTRIC MOTORS IN THE COURSE OF POSTREPAIR TESTS

В статье предложены методы по нагружению асинхронных электродвигателей после ремонта током и моментом. Данная методика имеет преимущества. Вместо испытаний при помощи механической нагрузки с присоединением дополнительных машин на валу испытуемого электродвигателя предлагается использовать динамические режимы машины, что позволит отказаться от механических соединений. Изменение частоты напряжения напрямую влияет на момент на валу машины и ток электродвигателя. Применяя эти свойства, можно получить значение средней мощности на валу, что является необходимым при испытании машин после ремонта. Также данная методика предполагает рекуперацию электро-

энергии в сеть. Для подтверждения заявленной методики авторы приводят результаты моделирования данного процесса. Представленные материалы наглядно подтверждают целесообразность использования пониженной частоты 25 Гц, в данном режиме получено наибольшее значение мощности на валу машины и отдаваемой в сеть мощности. Предлагается применять две схемы в зависимости от требований к энергоэффективности системы.

In article offered methods on loading of asynchronous electric motors after repair by current and the moment. This technique has advantages. Instead of tests by means of mechanical loading with connection of additional machines on a shaft of the examinee of the electric motor it is offered to use the dynamic modes of the machine, that will allow to refuse mechanical connections. Change of frequency of tension directly influences the moment on a shaft of the machine and electric motor current. Applying these properties it is possible to receive value of an average power on a shaft that is necessary at test of machines after repair. Also this technique assumes recovery of the electric power. For confirmation of the declared technique authors bring results of modeling of this process. The presented materials visually confirm expediency of use of the lowered frequency of 25 Hz, in this mode received the greatest value of power on a shaft of the machine and the power given to a network is. It is offered to apply two schemes depending on requirements to energy efficiency of system.

*Ключевые слова: асинхронный электродвигатель, нагрузка, механическая мощность, момент на валу.
Key words: the asynchronous electric motor, loading, mechanical power, the moment on a shaft.*

Ч ИСЛЮ электродвигателей, подвергающееся ремонту, намного выше числа электродвигателей, выпускаемых промышленностью. В то же время характеристики электродвигателей, подвергающихся ремонту, существенно отличаются от характеристик новых машин и являются усредненными [1].

Технический уровень ремонтных предприятий значительно ниже заводов изготовителей. Это приводит к тому, что даже после проведения обязательных испытательных мероприятий повторный выход из строя отремонтированной машины является нередким явлением. Значительно уменьшить число отказов электродвигателей во время эксплуатации после ремонта возможно только улучшив проверку качества проведения ремонт [2].

На сегодняшний день существуют различные способы проверки электрических машин после ремонта, рекомендованные для использования с целью упрощения процесса диагностирования технического состояния.

На практике нашли широкое применение специализированные станции для испытаний электрических машин. При широком спектре ремонтируемого оборудования необходим сложный парк испытательного оборудования, реализовать который в условиях ремонтных цехов судоремонтных предприятий практически невозможно. Универсальное оборудование, пригодное для полнообъемных испытаний машин малой и большой мощностей, отсутствует.

Сложность технического осуществления поточного диагностирования очевидная, так как каждая электрическая машины должна проходить необходимый спектр испытательных режимов, на основании которых возможно получение полной картины по диагностированию параметров.

В настоящее время на судоремонтных предприятиях получила распространение упрощенная процедура испытаний электродвигателей, которая состоит из следующих этапов:

- 1) измерение сопротивления обмоток;
- 2) испытание изоляции обмоток относительно корпуса машины и между обмотками;
- 3) обкатка двигателя на холостом ходу [3].

Обкатка занимает незначительный промежуток времени лишь для того, чтобы убедиться, что ток холостого хода находится на приемлемом уровне, и в работе АД нет явных дефектов (заклинивание подшипников, цепляние ротора о пакет статора и т.п.). Данный регламент проведения испытаний направлен на снижение состава оборудования испытательных станций. С другой стороны, снижение качества проверки напрямую влияет на количество отказов электродвигателей после ремонта.

Пригодность электрической машины для использования в условиях эксплуатации может быть определена только после производства испытаний в полном объеме, в том числе испытаний под токовой и механической нагрузкой. Под термином «нагружение электрической машины» (электрического двигателя) предполагается искусственное нагружение токами или моментом с целью получения информации о качественных характеристиках отремонтированных машин.

После завершения ремонта предприятие гарантирует безаварийную работу. В случае повторной неисправности гарантийное обслуживание становится возможным после завершения рейса. Выход из строя ответственного электропривода может привести к существенному ухудшению результатов рейса, а иногда и невозможности дальнейшего продолжения промысла. Судовладельцы напрямую заинтересованы в улучшении качества ремонта электрооборудования и требуют его выполнения от предприятий. Нередки случаи, когда групповые инженеры-электромеханики требуют проведения испытаний, по длительности превышающих общепринятые в несколько раз. Все это указывает на необходимость модернизации процесса испытаний электрооборудования, в частности испытаний электрических машин.

В рамках исследования предлагается испытывать АД под токовой и механической нагрузкой путем введения машины в циклический динамический режим [3]. В данной статье рассматривается метод изменения частоты вращения АД при помощи резкого изменения частоты питающего напряжения. Данный метод нагружения имеет преимущества перед методом противовключения, когда частота вращения АД и механический момент на валу циклически изменяются при изменении чередования фаз АД с применением бездуговой коммутации и методом непосредственной нагрузки, когда механический момент на валу АД создается естественным путем с использованием спарки двух электрических машин.

Схема предлагаемого нагрузочного устройства представлена на рис. 1. На рис. 2а представлена механическая характеристика АД в режиме нагружения, где f_1 — естественная механическая характеристика, которой соответствует номинальная частота сети 50 Гц; f_2 — искусственная характеристика, полученная при понижении частоты питающего электродвигатель напряжения.

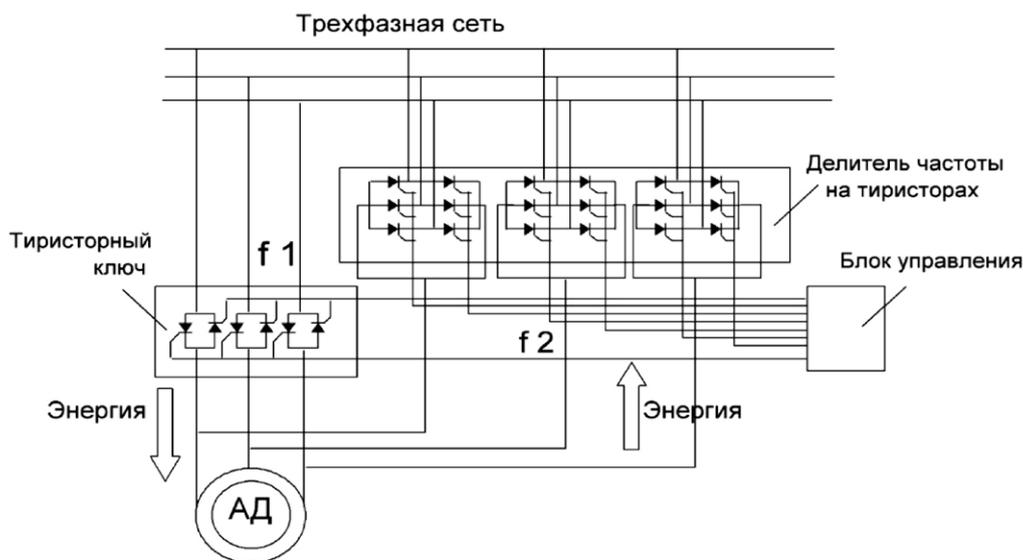


Рис. 1. Схема нагрузочного устройства

Устройство работает следующим образом. В первый момент времени асинхронный электродвигатель АД подключается к сети f_1 с частотой 50 Гц и работает на участке ab механической характеристики, представленной на рис. 2а, при этом открыт тиристорный ключ, в результате чего асинхронный электродвигатель вращается с номинальной частотой. Далее асинхронный электродвигатель отключается от сети и подключается к делителю частоты на тиристорах, который обе-

спечивает выходной сигнал f_2 с частотой 25 Гц, при этом тиристорный ключ закрывается. Рабочая точка на рис. 2а электродвигателя переходит в точку с искусственной механической характеристикой. Применение делителя частоты позволит значительно упростить систему, так как позволит избежать применения многофункциональных промышленных частотных преобразователей. Управление тиристорным переключателем и делителем осуществляется при помощи блока управления, оснащенного микроконтроллером. Асинхронный электродвигатель 1 снижает обороты путем рекуперативного торможения с отдачей электроэнергии в сеть, в результате чего достигается эффект экономии затраченной электроэнергии. На рис. 2а этому режиму соответствует отрезок bc искусственной характеристики f_2 . После установления номинальной частоты вращения асинхронный электродвигатель 1 снова подключается к сети f_1 . При циклическом переключении f_1 и f_2 возникающий механический момент позволяет создать эквивалент механической нагрузки без применения дополнительных устройств.

Делитель частоты состоит из трех комплектов тиристоров $VS1-VS3$. Принцип работы делителя частоты подробно представлен на рис. 2. Деление частоты в два раза в каждой фазе обеспечивается поочередным отпиранием тиристоров.

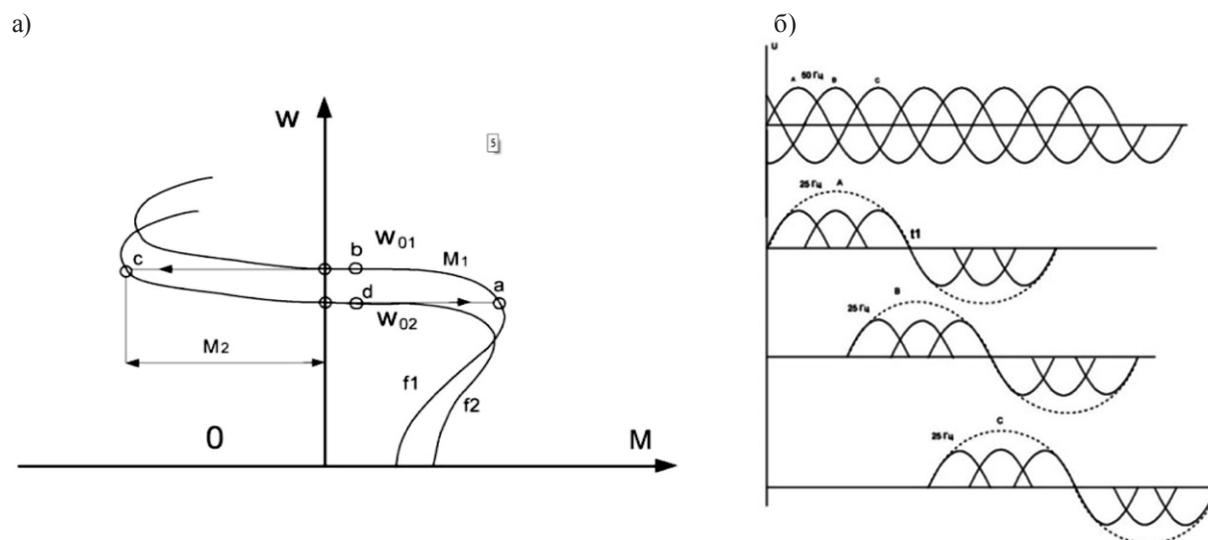


Рис. 2. Принцип работы делителя частоты:

a — механическая характеристика двигателя; b — выходное напряжение делителя

Первоначально открытые тиристоры $VS1$ пропускают ток только в прямом направлении. В момент времени t_1 оказываются открытыми тиристоры $VS1$, пропускающие ток в обратном направлении. Так формируется напряжение частотой 25 герц в фазе А электродвигателя. Происходит отпирание тиристоров $VS2$ с начальной фазой напряжения $\varphi_2 = 240^\circ$ и формируется напряжение фазы В электродвигателя. Аналогично происходит формирование кривой напряжения фазы С электродвигателя поочередным отпиранием $VS3$ с начальной фазой $\varphi_3 = 480^\circ$. Далее цикл повторяется со сдвигом 240° , тем самым обеспечивается сдвиг фазы 120° для напряжения частотой 25 герц, в два раза меньшей заданной первоначально частоты.

На рис. 3 и 4 представлены результаты моделирования представленной системы в Sym Power systems [5]. Эксперимент проводился в пределах одного переключения. Первоначально было определено время переходного процесса, т. е. время, за которое электродвигатель набирает заданную частотой сети скорость. На рис. 3а представлен график скорости машины. По оси абсцисс отложено время, измеренное в секундах. По оси ординат отложена частота вращения машины, измеренная в рад./с. Видно, что режим рекуперативного торможения [6] протекает от 0,25 с до 0,37 с. В этом режиме значительная часть запасенной электрической энергии отдается в сеть. На рис. 3б изображен момент электродвигателя, процесс торможения сопровождается отрицательными значениями момента на участке от 0,25 с до 0,35 с. Созданный на валу электромагнитный момент в режиме рекуперативного

торможения является эквивалентом нагрузочного момента. Для определения средней эквивалентной мощности [7] на валу машины производилось интегрирование механического момента на отрезке времени от 0,25 до 0,5, что соответствует времени процесса нагружения.

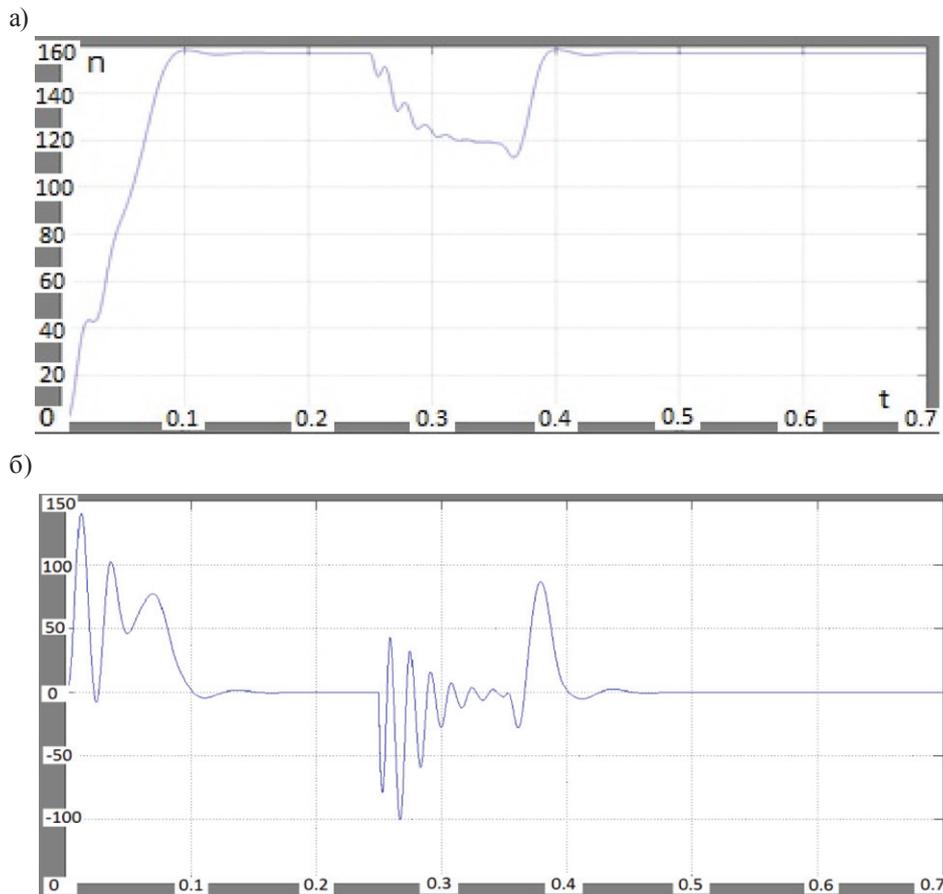


Рис. 3. Результаты моделирования:
а — скорость электродвигателя в режиме нагружения;
б — момент на валу электродвигателя в режиме нагружения

Полученное значение средней механической мощности на валу в процессе интегрирования представлено на рис. 4. По оси абсцисс отложено время испытания, измеряемое в секундах. По оси ординат — средняя мощность на валу в процессе интегрирования. Нужно отметить, что интегрирование производилось без учета знака момента, так как знакопеременное значение момента на валу является полезным для нагружения АД в любом случае.

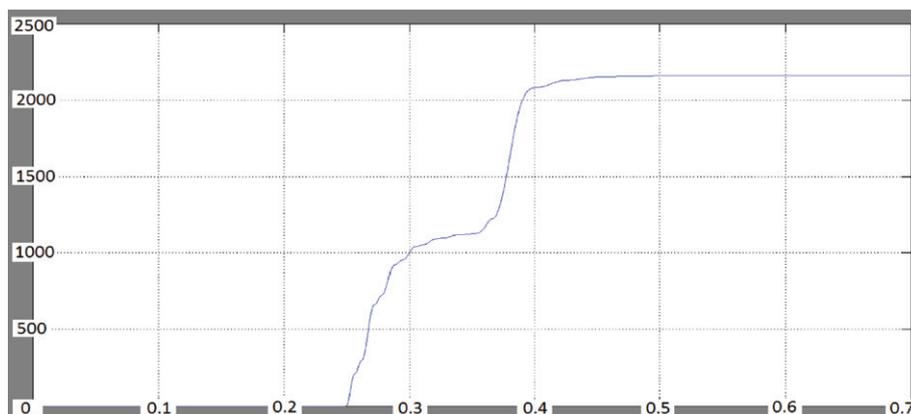


Рис. 4. Мощность на валу электродвигателя

При резком понижении частот питающего напряжения с 50 Гц до 25 Гц мощность на валу машины достигает порядка 58%, что является достаточно хорошим показателем. Другими словами, достигается значительное увеличение нагрузочной мощности на валу электродвигателя.

Одним из преимуществ предлагаемой системы является рекуперация электроэнергии в сеть при торможении асинхронного двигателя [8]. Для уменьшения гармонических составляющих, а также для удовлетворения требований магнитной совместимости электрооборудования применяются LC-фильтры. Для оценки отдаваемой мощности в рамках эксперимента на компьютерной модели производился расчет с учетом знака момента. Такой подход позволил выявить полезную мощность, затраченную на вращение. Результаты представлены на рис. 5.

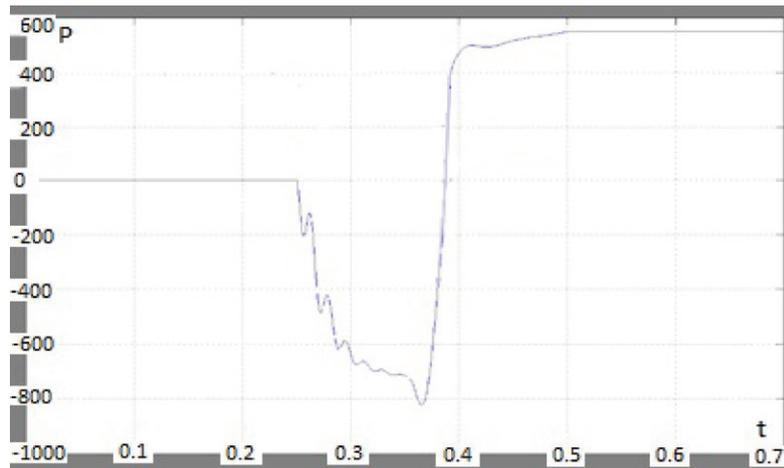


Рис. 5. Мощность электродвигателя, затраченная на вращение и нагрев

Как видно из диаграммы, мощность, затраченная на вращение АД, составляет порядка 600 Вт из полученных 2200 Вт в качестве эквивалентной нагрузки. В процентном соотношении 27% идет на разгон и нагрев машины. Остальные 70% мощности возвращаются в процессе рекуперативного торможения на отрезке времени от 0,25 до 0,37 с.

В рамках эксперимента проводились испытания электродвигателей различной мощности. Результаты проведения испытаний с использованием искусственной нагрузки представлены на рис. 6. Видно, что показания создаваемой механической мощности на валу различных по мощности электродвигателей стабильны и отличаются незначительно.

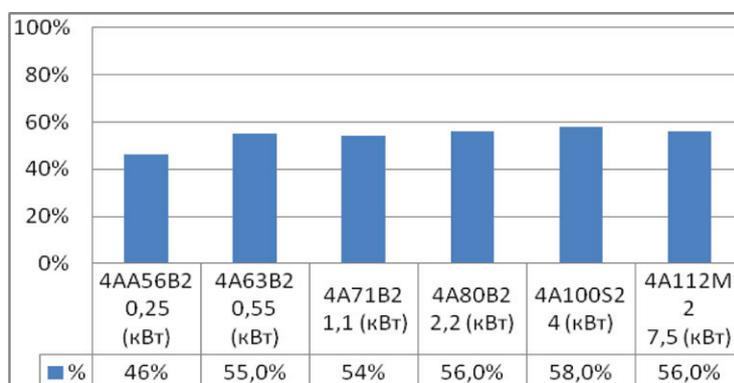


Рис. 6. Результаты моделирования

Рекуперация электрической энергии в цепь переменного тока может оказаться проблематичной, так как тяжело обеспечить необходимое совпадение напряжений сети и машины по фазе [9]. Применение LC-фильтров связано с некоторыми потерями и снижением энергосбережения.

В тех случаях, где рекуперация является желательным процессом, возможно применение схемы, представленной на рис. 7. Данное схемное решение предусматривает отдачу электроэнергии не напрямую в сеть, а накопление ее в цепи постоянного тока. Осуществить переход к постоянному току возможно при помощи выпрямителя. Накапливать энергию можно в аккумуляторе (для дальнейшего использования) или в конденсаторе для немедленного использования в цепи постоянного тока предлагаемой системы.

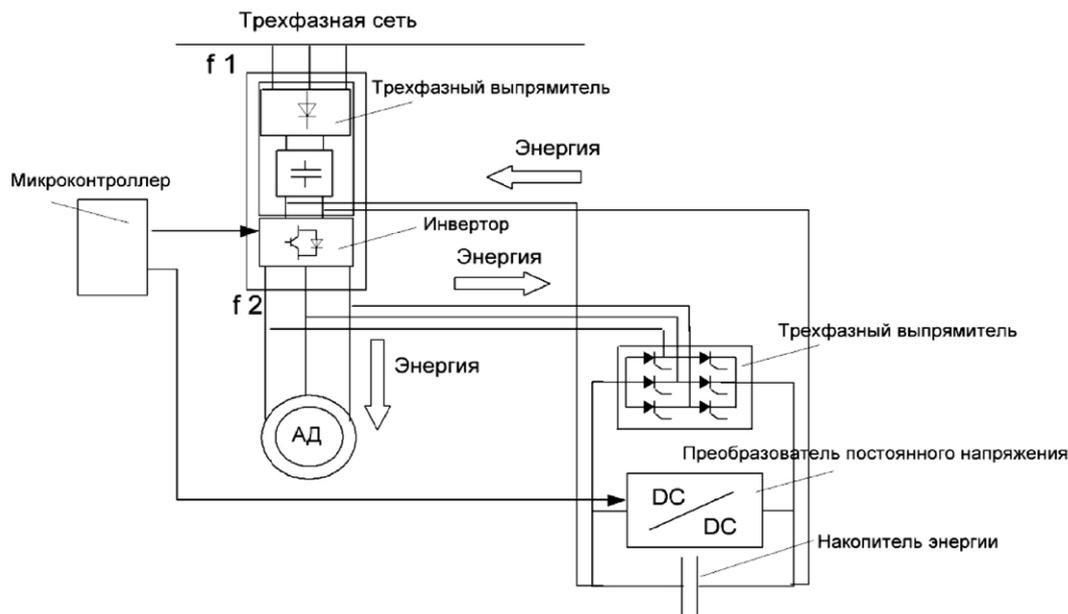


Рис. 7. Схема нагрузочного устройства с циркуляцией электрической энергии

Частотный преобразователь со звеном постоянного тока включает трехфазный выпрямитель и инвертор для преобразования постоянного тока в переменный трехфазный с заданной частотой. Для накопления энергии постоянного тока используется конденсатор для стабилизации напряжения применяется преобразователь постоянного напряжения. При помощи выпрямителя происходит преобразование тока. Управление преобразователем и инвертором осуществляется при помощи микроконтроллера.

Схема работает следующим образом. На частотный преобразователь подается трехфазное напряжение с частотой 50 Гц. Далее при помощи управляемого инвертора и микроконтроллера происходит резкое понижение частоты. Электродвигатель АД переходит в режим рекуперативного торможения с отдачей электрической энергии в сеть. При помощи микроконтроллера и преобразователя постоянного напряжения поддерживается напряжение заряда конденсатора через трехфазный выпрямитель. В целях динамического нагружения машины при помощи изменения управляющего сигнала микроконтроллера на инвертор частота напряжения изменяется до номинального значения. После разгона электродвигателя данный цикл повторяется. Конденсатор разряжается на звено постоянного тока преобразователя частоты в момент разгона машины и подпитывает ее запасенной в момент рекуперации энергией, тем самым осуществляет экономию электроэнергии.

Из проведенных испытаний АД с использованием искусственного нагружения можно сделать следующие выводы:

1. Упрощенный объем послеремонтных испытаний АД осуществляется на специальных станциях, не соответствующих требованиям современного рыбопромыслового флота в области качества ремонта и энергосбережения. Необходима разработка новых методов испытаний электродвигателей с применением полупроводниковых и микропроцессорных устройств.

2. Предлагаемый в статье метод позволит выйти за пределы упрощенного метода испытаний и использовать проверку АД после ремонта под «искусственной» нагрузкой.

3. Применение полупроводниковых делителей частоты, позволяющих использовать кратность частот напряжения ровно в два раза, значительно упростит конструкцию в тех случаях, где необходима экономия электроэнергии в пределах цеха.

4. В ходе проведения экспериментов была выявлена рекуперация электроэнергии в сеть [10]. В среднем значение отдаваемой мощности соответствует значению 70% от мощности нагрузки.

5. Для улучшения процесса рекуперации возможен перевод в постоянный ток при помощи неуправляемого выпрямителя и конденсатора для накопления энергии. Данное решение позволяет повысить энергоэффективность, так как устройство не предполагает отдачу электроэнергии в сеть, а ее циркуляцию в пределах схемы.

В результате вышесказанного можно говорить о возможности испытания электрических машин под нагрузкой без использования сложных нагрузочных механических устройств.

Список литературы

1. Жерве Г. К. Промышленные испытания электрических машин. — 4-е изд./ Г. К. Жерве. — Л.: Энергоатомиздат, 1984. — С. 351–354.

2. Голдберг О. Д. Испытание электрических машин: учеб. для вузов. — 2-е изд. / О. Д. Голдберг. — М.: Высш.шк., 2000. — С. 164–166.

3. Котеленец Н. Ф. Испытания, эксплуатация и ремонт электрических машин: учебник для вузов / Н. Ф. Котеленец. — М.: Издательский центр «Академия», 2003. — С. 99–103.

4. Портнягин Н. Н. Разработка методов технического диагностирования асинхронного двигателя / Н. Н. Портнягин, А. А. Марченко, А. А. Ушакевич // Вестник КамчатГТУ. — Петропавловск-Камчатский, 2011. — Вып. 18. — С. 29–32.

5. Герман-Галкин С. Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0 : учебное пособие / С. Г. Герман-Галкин. — СПб.: КОРОНА принт, 2001. — С. 233–239.

6. Вольдек А. И. Электрические машины: учеб. для высш. техн. заведений. — 3-е изд. / А. И. Вольдек. — Л.: Энергия, 1978. — С. 510–514.

7. Марченко А. А. Моделирование процесса динамического нагружения асинхронного электродвигателя / А. А. Марченко, Н. Н. Портнягин // Современ. проблемы науки и образования. — 2012. — № 6. — С. 125–125.

8. Марченко А. А. Исследование процесса динамического нагружения асинхронного электродвигателя / А. А. Марченко, Н. Н. Портнягин // Фундам. исслед. — 2013. — № 1–2. — С. 408–412.

9. Марченко А. А. Определение диапазона номинальной мощности электродвигателей при испытаниях методом динамического нагружения / А. А. Марченко // Электротехнические и информационные комплексы и системы. — 2014. — № 2 — Т. 10. — С. 38–44.

10. Марченко А. А. Процесс получения максимальной механической мощности на валу электродвигателя при испытаниях электрических машин // Наука, образование, инновации: пути развития : материалы 4-й Всерос. науч.-практ. конф. (23–25 апр. 2013 г.) / А. А. Марченко. — Петропавловск-Камчатский. — 2013. — Ч. 1. — С. 128–130.