

УДК 62-9

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАБОТЫ ЕС-ДВИГАТЕЛЕЙ**Игошин В.А., Аминов Б.А.***Казанский государственный энергетический университет, Казань, e-mail: saile@yandex.ru*

В настоящее время при проектировании систем отопления, вентиляции и кондиционирования все больше внимания уделяется вопросам энергосбережения. Известно, что системы ОВК потребляют до 70% энергоресурсов в промышленных, больших коммерческих или общественных зданиях. Одним из новых направлений в данном вопросе является применение так называемых ЕС-двигателей. ЕС-двигатель имеет внешний ротор, в котором располагаются сегменты с постоянными магнитами. Следует отметить, что при работе ЕС-двигатель практически не выделяет тепла, в то время как АС-мотор имеет рабочую температуру +35...+75°C, что накладывает дополнительную тепловую нагрузку на контур охлаждения. Поскольку ротор ЕС-двигателя является внешним с постоянными магнитами, в нем отсутствуют тепловые потери, неизбежные в случае короткозамкнутого ротора асинхронного двигателя. Отсюда высокий КПД, достигающий 80–90%.

Ключевые слова: отопления, вентиляция, кондиционирования, ЕС-двигатель, энергосбережения.

COMPARATIVE ANALYSIS OF EC-MOTORS**Igoshin V.A., Aminov B.A.***Kazan State Power Engineering University, Kazan, e-mail: saile@yandex.ru*

Currently, in the design of heating, ventilation and air conditioning more and more attention is paid to energy conservation. We know that HVAC systems consume up to 70% of energy in industrial, large commercial or public buildings. One of the new directions in this regard is the use of so-called EC-motors. EC motor has an outer rotor in which the segments arranged with permanent magnets. It should be noted that when the EC-engine substantially does not emit heat, while the AC motor is at operating temperature +35 ... + 75 ° C, which imposes an additional thermal load on the cooling circuit. Since EU-rotor engine is an external permanent magnet, there are no heat losses that are inevitable in case of a short-circuited rotor induction motor. Hence, high efficiency, reaching 80-90%.

Keywords: heating, ventilation, air-conditioning, EC-motor, energy saving.

В настоящее время при проектировании систем отопления, вентиляции и кондиционирования все больше внимания уделяется вопросам энергосбережения.

Все чаще специалисты ориентируются на приобретение энергосберегающего оборудования. По сравнению с традиционным оно более дорогое, но полностью окупает себя в процессе эксплуатации. ЕС-двигатели, которым посвящена данная статья, позволяют уменьшить энергопотребление, при этом увеличить производительность оборудования и срок его бесперебойной работы.

В соответствии с Федеральным законом № 261 ФЗ от 03.11.2009 г. «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» рациональное использование энергетических ресурсов отнесено к проблемам государственной важности.

Известно, что системы ОВК потребляют до 70% энергоресурсов в промышленных, больших коммерческих или общественных зданиях. В связи с этим использование наиболее эффективных энергосберегающих средств и методов в данной области становится чрезвычайно актуальной зада-

чей. Одним из новых направлений в данном вопросе является применение так называемых ЕС-двигателей, о которых специалистам ОВК известно сравнительно мало. Тем не менее, ряд зарубежных, а в последнее время и отечественных поставщиков климатической техники рассматривают ЕС-двигатели как опции, доступные к практическому применению.

ЕС-двигатель имеет внешний ротор, в котором располагаются сегменты с постоянными магнитами. Управление вращением ротора ЕС-двигателя осуществляется за счет контролируемой подачи электроэнергии на обмотку статора в зависимости от положения ротора, которое отслеживается при помощи датчиков Холла, а также заданных параметров регулирования, поступающих, например, от внешних датчиков соответствующего типа в виде токовых (4–20 мА) или потенциальных (0–10 В) сигналов. При этом встроенный PID-регулятор позволяет, наряду с пропорциональным управлением, устанавливать скорость реагирования двигателя на изменение управляющего сигнала в зависимости от его дифференциальных и интегральных показателей. ЕС-двигатель в разрезе представлен на рис. 1.

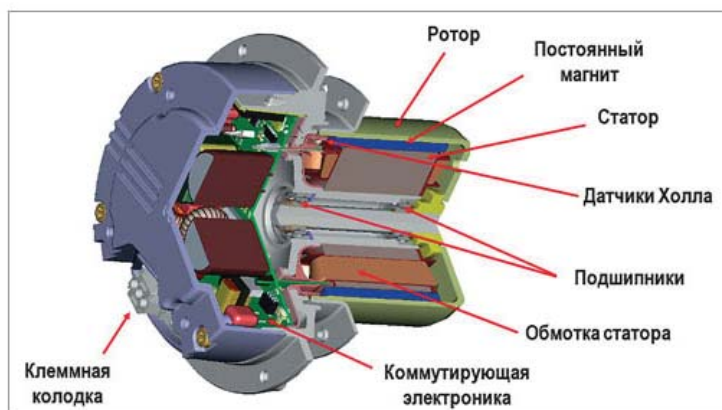


Рис. 1. Устройство энергосберегающего ЕС-двигателя

ЕС-двигатели возможно подключать к постоянному источнику напряжения согласно параметрам или через встроенный коммутационный модуль непосредственно к сети переменного тока (220 В, 380 В). С использованием стандартного приборного интерфейса RS 485 или специальной шины ebm BUS обеспечена возможность управления вентилятором (либо группой вентиляторов до 31 шт. в каждой) при помощи ПК или КПК. Количество групп вентиляторов в интегрированной системе управления может достигать 256. Возможно также использование технологии Bluetooth. Предусмотрена выдача тревожных и аварийных сигналов, а также обеспечение мониторинга работы системы.

Области применения ЕС-двигателей в системах ОВК еще только намечаются в последние годы. Тем не менее, в отдельных приложениях ЕС-двигатели уже завоевали твердые позиции, зарекомендовав себя в положительном отношении по ряду ключевых показателей. Ниже кратко описаны некоторые из успешно освоенных областей применения ЕС-двигателей.

Тепловые насосы систем «воздух – вода» и «воздух – воздух», оснащенные ЕС-двигателями, в качестве основного преимущества характеризуются синхронной работой вентиляторов, что не может быть обеспечено в полной мере при использовании асинхронных двигателей переменного тока (АС-двигателей). Кроме того, отсутствие проскальзывания магнитного поля в ЕС-двигателях, что имеет место в АС-двигателях независимо от способа управления ими, исключает потери энергии, свойственные данному неблагоприятному явлению. В целом энергопотребление и, соот-

ветственно, срок окупаемости тепловых насосов сокращаются вдвое.

Овощехранилища и грибные камеры, оснащенные ЕС-двигателями в составе программно-технического комплекса «Тургор АМ», характеризуются оптимальным регулированием числа оборотов и, соответственно, производительности вентиляторов до необходимого в данный момент значения. По данным опытной эксплуатации это осуществляется более эффективным образом по сравнению с ранее использовавшимися АС-двигателями, оснащенными частотным приводом и ПИД-регуляторами.

В овощехранилищах это способствует поддержанию сохранности и качества загружаемых овощей и корнеплодов на протяжении всего межсезонного периода. В грибных камерах достигается двукратное увеличение объема производства шампиньонов на тех же площадях. Срок окупаемости в обоих случаях не превышает одного года.

Циркуляторы воздуха (дестратификаторы), имеющие в своем составе ЕС-двигатели, возможно объединять в сеть с централизованным управлением. По данным фирмы Avedon Engineering, производимые ею дестратификаторы серии Airus, работающие децентрализованно в составе единой сети управления, позволяют экономить до 35% энергетических затрат по сравнению с обычными вентиляторными установками, используемыми для снижения температурного градиента по высоте помещения при наличии существенных теплоизбытков.

Фэнкойлы производства фирмы Трох, оснащенные ЕС-двигателями, характеризуются значением удельной потребляемой мощности (Specific Fan Power, SFP), посто-

янным во всем диапазоне производительности, равным 0,3, в сравнении со значением 0,8, типичным для оснащенных АС-двигателями фэнкойлов. Совместно с регулированием производительности в зависимости от реальной потребности это позволяет снизить среднегодовое потребление энергии с 620 до 140 кВт·ч.

Охлаждаемые прилавки, оснащение которых ЕС-двигателями впервые было инициировано фирмой Heatcraft Refrigeration Products (HRP), оказались настолько эффективными, что, например, в США энергетическая комиссия штата Калифорния (California Energy Commission, CEC) включила использование ЕС-двигателей в состав обязательных требований ко всем вновь разрабатываемым образцам холодильного оборудования.

Модулирующие газовые горелки, имеющие в своем составе вентиляторы с ЕС-двигателями для нагнетания воздуха, необходимого для горения, позволяют получить стабильное и сбалансированное пламя, что существенно улучшает условия эксплуатации котельной в целом и продлевает ресурс оборудования.

Прецизионные кондиционеры (Close Control в классификации EUROVENT) производства фирмы Tespaig стали оснащаться ЕС-двигателями сравнительно недавно. Это решение связано, прежде всего, с необходимостью отвечать возросшим современным требованиям к энергоэффективности устанавливаемого оборудования. Вместе с тем и другие преимущества ЕС-технологии имеют высокую актуальность в данных областях применения, например, высокая точность регулирования, снижение шумности, увеличение надежности и срока службы.

Следует отметить, что при работе ЕС-двигатель практически не выделяет тепла, в то время как АС-мотор имеет рабочую температуру +35...+75°C, что накладывает дополнительную тепловую нагрузку на контур охлаждения. При этом ЕС-двигатели без дополнительного перегрева обеспечивают свою работоспособность в широком диапазоне температуры внешней среды. По данным EBM PAPST, температура разогрева работающего ЕС-двигателя на основании проведенного тестирования не превышает +45°C. Максимально и минимально допустимые температуры эксплуатации ЕС-двигателя составляют соответственно +75 и -20°C.

Особо важным для прецизионных кондиционеров медицинского назначения является то обстоятельство, что в соответствии с ГОСТ 52539-2006 в лечебных учреждениях помещения, относящиеся к группам 1 (высокоаэсептические операционные) и 2 (палаты интенсивной терапии), должны непрерывно обеспечиваться гарантированным подпором воздуха не менее 10–15 Па, но не более 20 Па. Указанные значения должны поддерживаться независимо от изменяющихся условий (открытие дверей, работа оборудования и т.д.).

Помещения, относящиеся к группе 5 (для инфицированных больных), наоборот, должны непрерывно обеспечиваться гарантированным разрежением. В первом случае это достигается превалированием притока над вытяжкой, а во втором – превалированием вытяжки над притоком, что обеспечивается регулированием расходов воздуха по показаниям внешних прессостатов, контролирующих перепад давления между помещениями.

Наиболее точное, безынерционное и эффективное регулирование расходов воздуха достигается использованием ЕС двигателей в качестве приводов вентиляторов, вследствие чего они рядом европейских стандартов (VDI3803, VDI2167 part 1, SWKI-Guideline 99-3) определены как комплектующий элемент кондиционеров медицинского назначения.

Аналогичное положение дел в соответствии с ГОСТ 14644-4-2002 является характерным для всех объектов прецизионного кондиционирования, имеющих в своем составе «чистые» помещения и связанные с ними контролируемые среды. Работа контроллеров в этих случаях осуществляется по показаниям не двух, как обычно, датчиков (термостат и гигросат), а трех датчиков, в число которых включается также прессостат. Последний работает в цепи управления ЕС-двигателями.

Сухие градирни и выносные воздушные конденсаторы компании Refrion оснащаются ЕС-вентиляторами нового поколения диаметром 800, 900 и 1 000 мм.

Технические показатели ЕС-вентиляторов:

- Улучшенные технические характеристики.

Новые ЕС-вентиляторы оснащены двигателями меньшего размера, но с улучшен-

ными техническими характеристиками, что позволило на 5% увеличить их мощность по сравнению со старой линейкой ЕС-вентиляторов.

- Низкие шумовые характеристики.

Вентиляторы не создают дополнительной шумовой нагрузки при регулировании скорости вращения. Уровень звукового давления уменьшается на 6 дБ по сравнению со старыми моделями.

- Безопасность.

Новые ЕС-вентиляторы выгодно отличаются дополнительной защитой от перегрева электроники и двигателей вентиляторов, а также защитой от блокировки ротора, потери фазы и резких скачков напряжения, обеспечивая бесперебойную работу как в неблагоприятных условиях окружающей среды, так и при сбоях электропитания.

- Высокий моторесурс.

Новые ЕС-вентиляторы в силу разгруженности подшипниковых узлов по осевым и радиальным усилиям, а также благодаря встроенной защите по электропитанию обладают высоким моторесурсом, составляющим более 80 000 часов.

- Возможность удаленного контроля.

Новые ЕС-вентиляторы можно коммутировать с Modbus, таким образом, упростив дистанционный контроль над эксплуатационными параметрами вентиляторов (благодаря шкафу управления Intelliboard с интегрированным PLC).

Компактность, низкое энергопотребление, плавное и точное регулирование, низкий уровень шума, отсутствие вибрации, согласованность с рабочим колесом по аэродинамике и мощности, а также ряд других излагаемых ниже особенностей ЕС-

двигателей являются причиной все более возрастающего интереса к ним.

Преимущество в габаритах обусловлено тем, что ЕС-двигатели, являясь более компактными по сравнению с АС-двигателями, полностью вписываются в габариты крыльчатки вентилятора, обеспечивая прямой привод, в то время как вентиляторы с АС-двигателями занимают значительно больше места, особенно в направлении потока воздуха, что означает необходимость наличия несколько увеличенных размеров ventкамеры. Размер выходного отверстия ЕС-вентилятора практически совпадает с поперечными размерами секции, в которой он размещается. Это приводит, с одной стороны, за счет предварительно выровненного потока воздуха к более эффективному использованию поверхности теплообменника, устанавливаемого за вентилятором, и улучшению съема с него тепла/холода, а с другой стороны, снижает скорость прохождения воздуха внутри секции вентилятора, уменьшает потери давления и шумность. Преимущества в сравнении с АС-двигателем, имеющим ременной привод, схематично показаны на рис. 2.

У ЕС-вентиляторов практически отсутствуют пиковые пусковые токовые нагрузки за счет того, что встроенный регулятор обеспечивает достаточно плавное нарастание амплитуды переменного тока от нуля до номинального значения. В то же время пусковой ток у АС-вентиляторов обычно в 5–7 раз превышает номинальный, что приводит к необходимости увеличения сечения электропроводки и параметров пускового оборудования, которые выбираются в расчете на значения пускового тока.

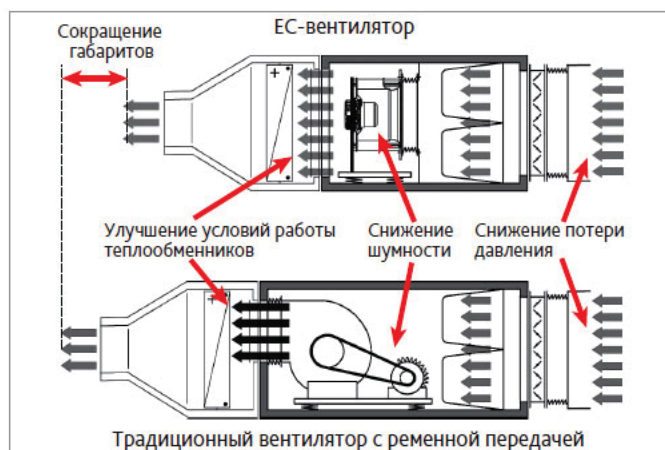


Рис. 2. Преимущества ЕС-вентилятора

Поскольку ротор ЕС-двигателя является внешним с постоянными магнитами, в нем отсутствуют тепловые потери, неизбежные в случае короткозамкнутого ротора асинхронного двигателя. Отсюда высокий КПД, достигающий 80–90%. На рис. 3 приводится сравнение КПД двигателей различного типа, среди которых ЕС-двигатель характеризуется рекордными значениями в широком диапазоне полезной мощности на выходе.

Наряду с высоким КПД, высокая степень энергосбережения при использовании ЕС-двигателей в системах ОВК достигается за счет регулирования числа оборотов. Известны следующие соотношения между числом оборотов (n_1, n_2), расходом (L_1, L_2),

потерей напора ($\Delta p_1, \Delta p_2$) и потребляемой мощностью (N_1, N_2):

$$L_1/L_2 = n_1/n_2; \quad \Delta p_1/\Delta p_2 = (L_1/L_2)^2 = (n_1/n_2)^2;$$

$$N_1/N_2 = (\Delta p_1 L_1)/(\Delta p_2 L_2) = (n_1/n_2)^3.$$

В силу кубической зависимости потребляемой мощности от числа оборотов их плавное и глубокое регулирование, обеспечиваемое ЕС-двигателями без преобразования частоты питающего напряжения, дает соответствующий значительный эффект в части снижения суммарных значений потребляемой мощности, иллюстрируемое на рис. 4 путем сравнения ЕС-двигателей с АС двигателями, использующими фазовое, амплитудное и частотное регулирование.

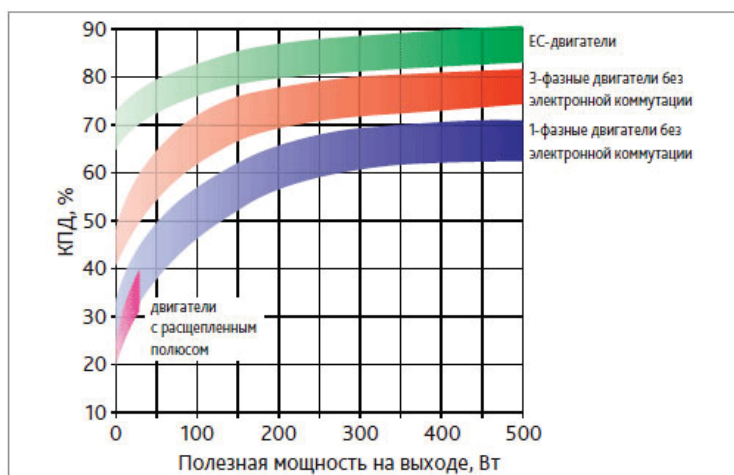


Рис. 3. Сравнение КПД двигателей различного типа

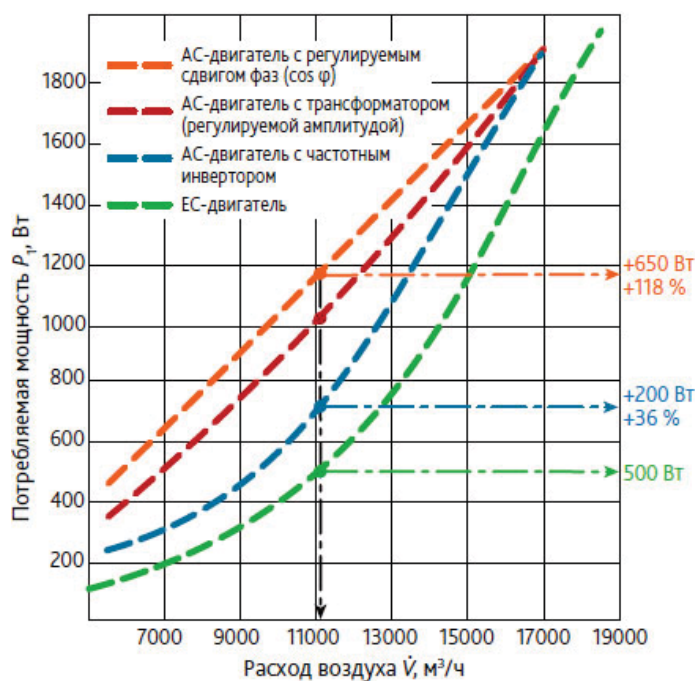


Рис. 4. Соотношение расхода и потребляемой мощности вентиляторов различного типа

С эксплуатационной точки зрения преимущества ЕС-двигателей обусловлены тем, что вращающиеся части исполнены как один динамически и статически сбалансированный компонент, общий вес которого равномерно распределен на оба опорных подшипника, что значительно влияет на срок службы изделия. Сопутствующим этому обстоятельством является также минимальная вибрация и шум при работе ЕС-двигателя.

Итак, сведем воедино основные аргументы в пользу ЕС:

- высокий КПД;
- высокая точность регулирования в соответствии с имеющимися условиями;
- адаптивность в соответствии с изменением внутренних климатических параметров;

- малые пусковые токи;
- режим работы с низким уровнем шума и минимальной вибрацией, длительный срок службы, не нуждается в обслуживании.

На рис. 5 представлены по данным фирмы Tescnair значения потребляемой мощности ЕС-двигателями, опционально поставляемыми в составе прецизионных кондиционеров (Computer Room Air Conditioners, CRAC) холодопроизводительностью 35, 42, 60, 70 и 75 кВт в сравнении со стандартно используемыми асинхронными двигателями переменного тока (АС-двигателями).

Аналогичное сравнение представлено на рис. 6 в отношении поставляемых фирмой Tescnair прецизионных кондиционеров CCU (CloseControlUnits), комплектуемых АС-двигателями с частотным регулированием.

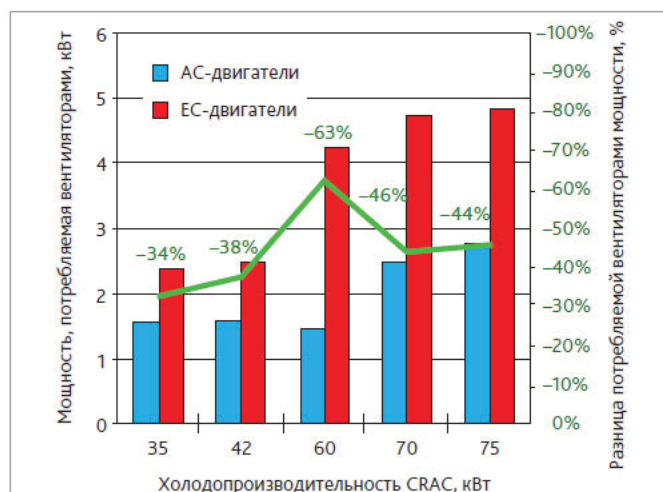


Рис. 5. Сравнительная оценка потребляемой мощности ЕС- и АС-двигателями, используемые в составе CRAC

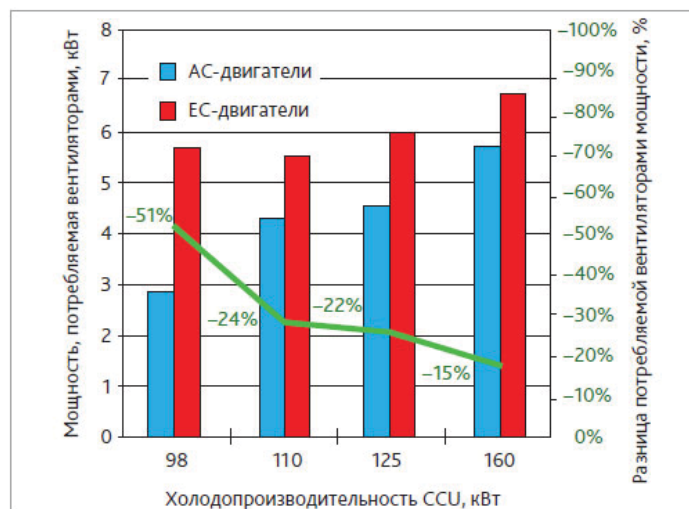


Рис. 6. Сравнительный анализ потребляемой мощности ЕС- и АС-двигателями, используемые в составе CCU (CloseControlUnit)

Очевидно, что при дополнительной стоимости ЕС- двигателя 100–200 долларов, капитальные затраты окупаются очень быстро.

Принцип PID-регулятора

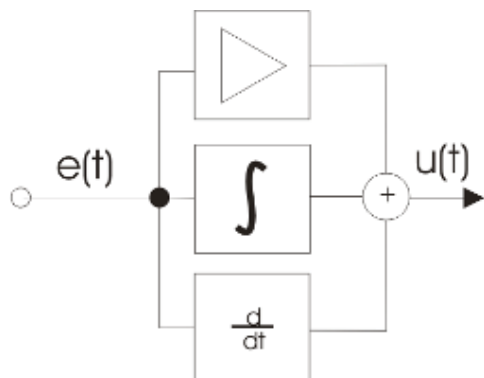


Рис. 7. Схема, иллюстрирующая принцип работы ПИД-регулятора

Пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) регулятор (рис. 7-8) – устройство в цепи обратной связи, используемое в системах автоматического управления для поддержания заданного значения измеряемого параметра. ПИД-регулятор измеряет отклонение стабилизируемой величины от заданного значения (установки) и

выдаёт управляющий сигнал, являющийся суммой трёх слагаемых, первое из которых пропорционально этому отклонению, второе пропорционально интегралу отклонения и третье пропорционально производной отклонения (или, что то же самое, производной измеряемой величины). Если какие-то из составляющих не используются, то регулятор называют пропорционально-интегральным, пропорционально-дифференциальным, пропорциональным.

Пропорциональная составляющая – Пропорциональная составляющая устраняет непосредственно ошибку в значении стабилизируемой величины, наблюдаемую в данный момент времени. Выходной сигнал пропорциональной составляющей тем больше, чем сильнее регулируемая величина отклоняется от установки. Если входной сигнал равен установке, то выходной равен нулю. При использовании пропорционального регулятора значение регулируемой величины никогда не стабилизируется на заданном значении. Существует, так называемая, статическая ошибка, которая равна такому отклонению регулируемой величины, которое обеспечивает выходной сигнал, стабилизирующий выходную величину именно на этом значении.

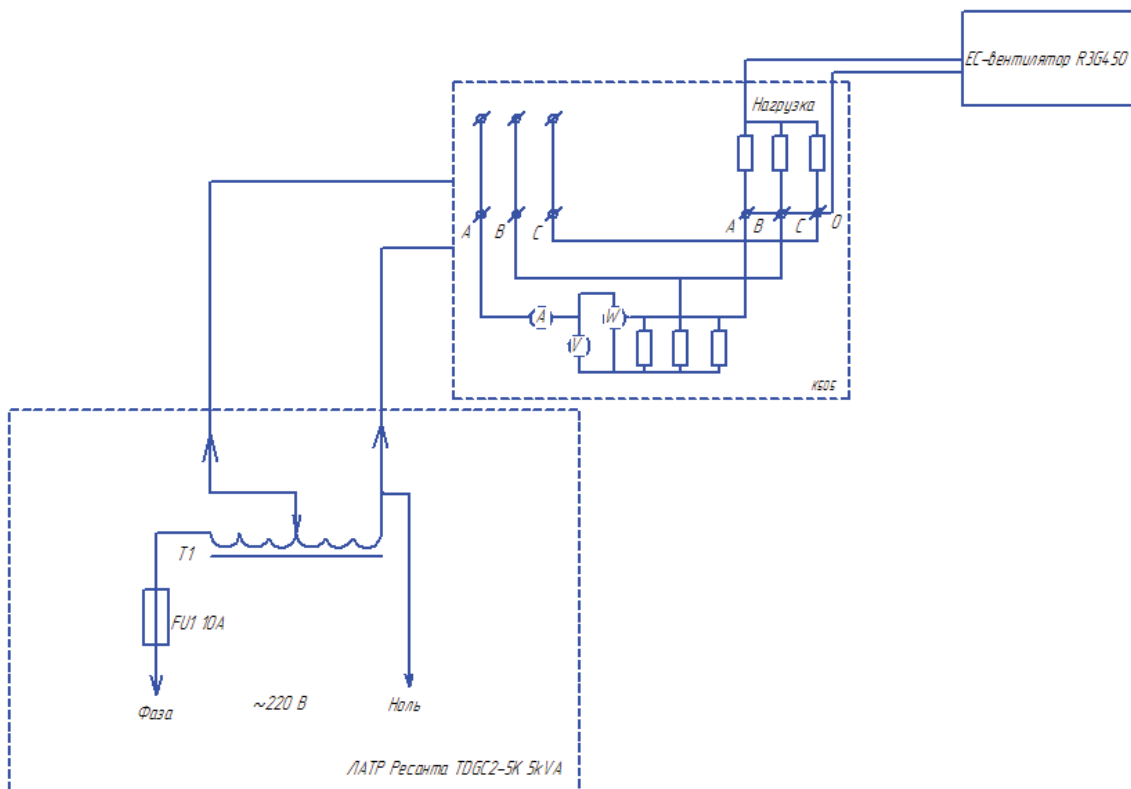


Рис. 8. Схема экспериментальной установки

Интегральная составляющая – Для устранения статической ошибки используют интегральную составляющую. Она позволяет регулятору «учиться» на предыдущем опыте. Если система не испытывает внешних возмущений, то через некоторое время регулируемая величина стабилизируется на заданном значении, сигнал пропорциональной составляющей будет равен нулю, а выходной сигнал будет полностью обеспечивать интегральная составляющая.

Дифференциальная составляющая – Дифференциальная составляющая противодействует предполагаемым отклонениям регулируемой величины, которые могут произойти в будущем. Эти отклонения могут быть вызваны внешними возмущениями или запаздыванием воздействия регулятора на систему. Чем быстрее регулируемая величина отклоняется от установки, тем сильнее противодействие, создаваемое дифференциальной составляющей.

Заключение

Проведя соответствующие замеры было получено, что ЕС-двигатель работает в пределах от -22% от $U_{ном}$ до +22% от $U_{ном}$ (от 180 до 270 Вольт).

Была получена зависимость скорость вращения от создаваемого давления $V=16,5 \times \exp(0,0025777 \times P)$.

Получены экспериментальным путем зависимости напряжения (в рабочих пределах 22%) от потребляемой мощности, тока и скорости вращения.

По полученным данным вычислено значение коэффициента активной мощности ($\cos\phi$).

Получены экспериментальные данные влияния PID фактора на работу ЕС-двигателя. Причем, температура в двигателе не меняется в пределах 33°C на 300 оборотах. Максимальное значение тока получено на скорости вращения 1380 об/мин и составило 47°C (рис. 9-11).

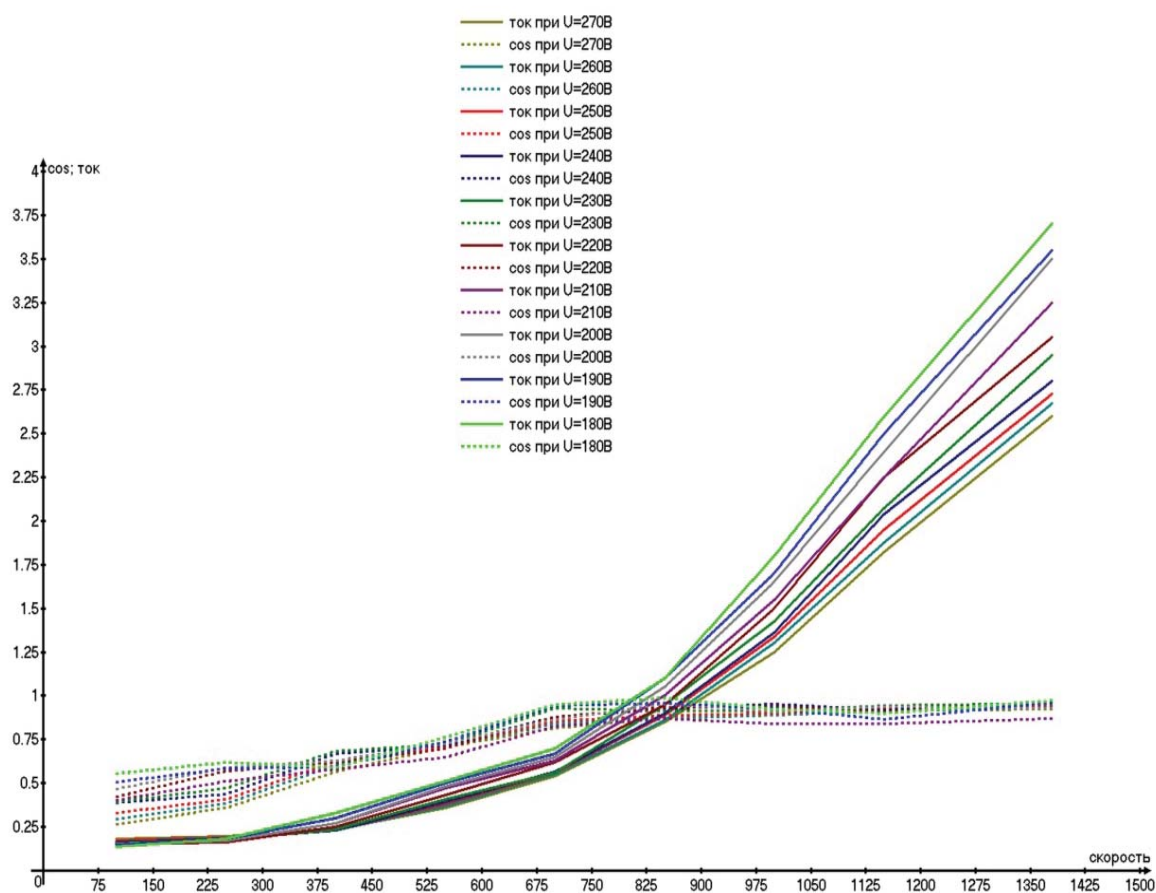


Рис. 9. Зависимость тока и коэффициента активной мощности от скорости вращения при изменении напряжения

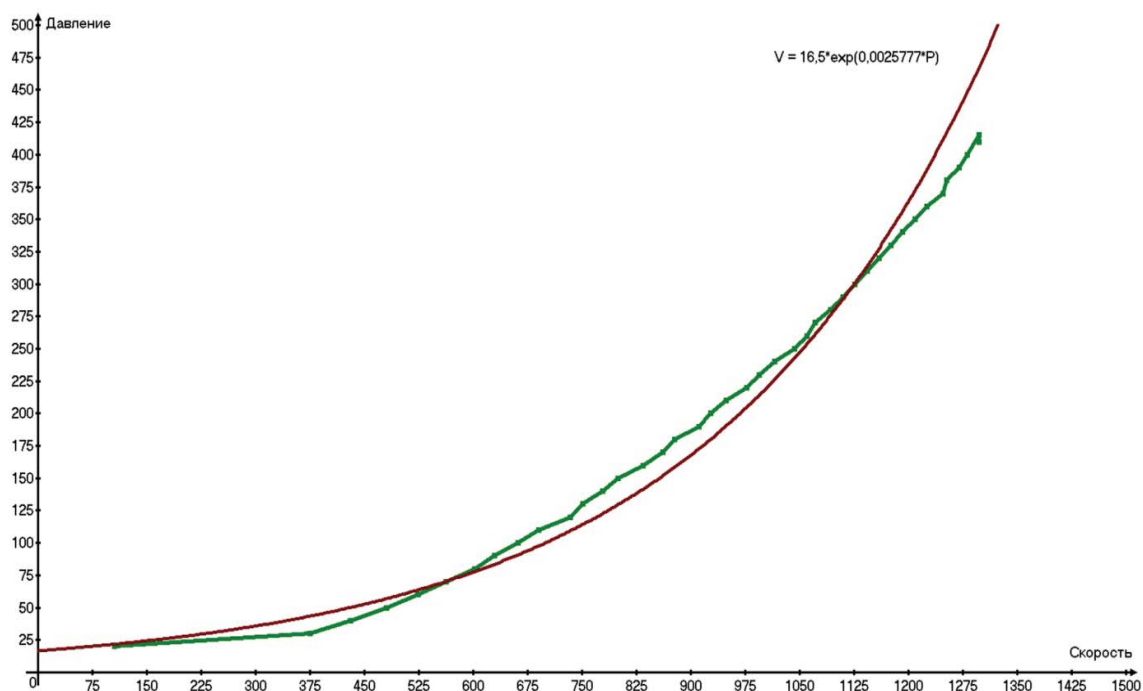


Рис. 10. Зависимость скорости вращения от создаваемого вентилятором давления

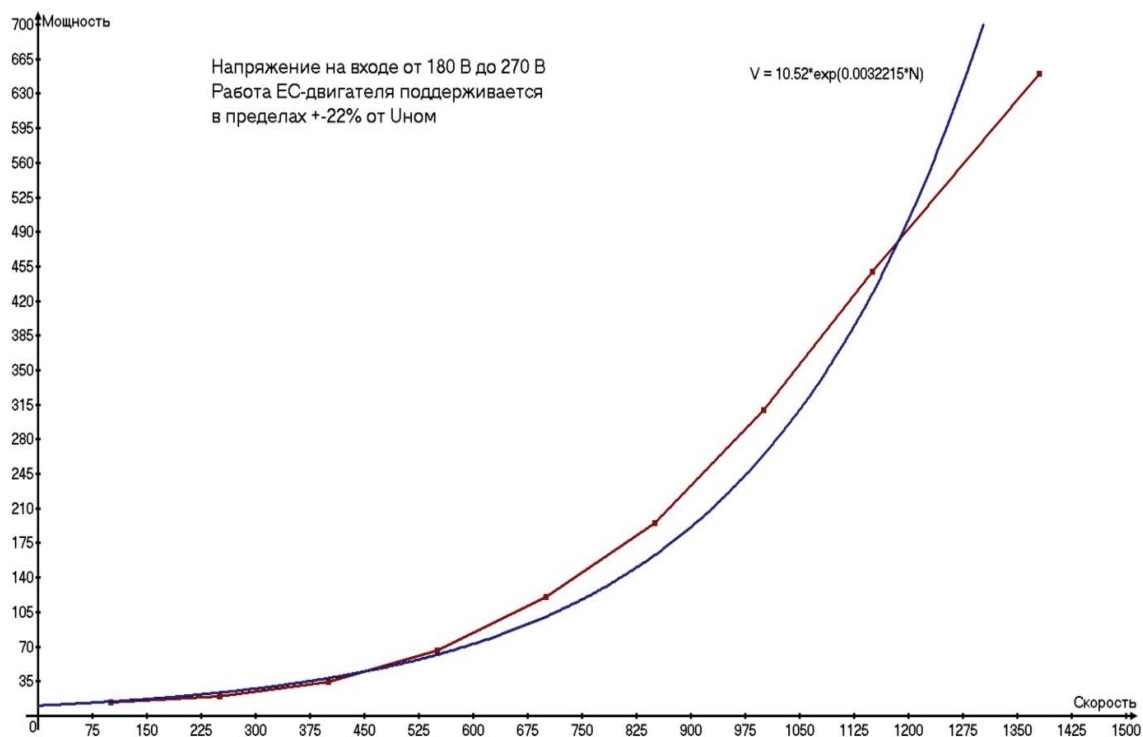


Рис. 11. Зависимость скорости вращения от потребляемой мощности

Срок окупаемости ЕС-двигателя составляет 2,3 года. Стоимость энергосберегающего двигателя на 20780 руб. больше стоимости обычных АС-двигателей.