

Научная статья

УДК 621.43

doi: 10.37670/2073-0853-2021-88-2-132-138

Методика выбора и способ повышения энергоэффективности силового агрегата стендов для проверки форсунок современных дизелей наземного транспорта

**Шамиль Файзрахманович Нигматуллин, Арсений Александрович Козеев,
Марсель Мусавинович Ямалетдинов**
Башкирский государственный аграрный университет

Аннотация. В настоящее время на стадии проектирования стендов для проверки топливоподающих систем типа Common Rail при выборе электродвигателя малой мощности возникает проблема превышения его температурного режима работы, которое может привести к существенному снижению срока эксплуатации силовой части стенда. Целью данной работы является оптимизация силовой части стенда для проверки современных форсунок дизельных двигателей. В ходе исследований были сняты осциллограммы фазного тока электродвигателя на разных режимах работы стенда. С помощью программного обеспечения был произведён расчёт крутящего момента на валу привода топливного насоса высокого давления. При сопоставлении полученных данных и технических характеристик электродвигателей был произведён выбор силовой части стенда. Для повышения энергоэффективности и в целях снижения потребления электроэнергии стенда в конструкцию силовой части было установлено маховое колесо. При диагностировании форсунок на всех режимах потребление фазного тока находилось в допустимых пределах. Это исключает превышение температурного режима электродвигателя, что и подтвердилось при эксплуатации стенда.

Ключевые слова: дизель наземного транспорта, форсунки, диагностика, нагревание, повышение температуры, измерительные приборы, энергоресурсы.

Для цитирования: Нигматуллин Ш.Ф., Козеев А.А., Ямалетдинов М.М. Методика выбора и способ повышения энергоэффективности силового агрегата стэндов для проверки форсунок современных дизелей наземного транспорта // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2021. № 2 (88). С. 132–138. doi: 10.37670/2073-0853-2021-88-2-132-138.

Original article

The method of selecting and improving the energy efficiency of the power unit stands for testing the injectors of modern diesel engines of land transport

Shamil F. Nigmatullin, Arseniy A. Kozeev, Marsel M. Yamaletdinov
Bashkir State Agrarian University

Abstract. At the present time, at the design stage of stands for testing Common Rail fuel supply systems, when choosing a low-power electric motor, the problem arises of exceeding its operating temperature, which can lead to a significant reduction in the service life of the power section of the stand. The purpose of this work is to optimize the power section of the test bench for testing modern diesel engine injectors. In the course of the research, oscillograms of the phase current of the electric motor were taken at different operating modes of the stand. The software was used to calculate the torque on the drive shaft of the high pressure fuel pump. Comparing the data obtained and the technical characteristics of the electric motors, the power section of the stand was selected. To improve energy efficiency and to reduce the stand's electricity consumption, a flywheel was installed in the structure of the power unit. When diagnosing injectors in all modes, the phase current consumption was within acceptable limits. This eliminates the excess of the temperature regime of the electric motor, which was confirmed during the operation of the stand.

Keywords: diesel for land transport, injectors, diagnostics, heating, temperature rise, measuring instruments, energy resources.

For citation: Nigmatullin Sh.F., Kozeev A.A., Yamaletdinov M.M. The method of selecting and improving the energy efficiency of the power unit stands for testing the injectors of modern diesel engines of land transport. Izvestia Orenburg State Agrarian University. 2021; 88(2): 132–138. (In Russ.). doi: 10.37670/2073-0853-2021-88-2-132-138.

В силовой части диагностического стэнда ВТС 101 МЕ, разработанного на кафедре «Автомобили и МТК» Башкирского ГАУ, устанавливали асинхронный ЭД АИР90L6, необходимый для привода топливного насоса высокого давления (ТНВД) в гидродинамической системе (ГДС) стэнда, с потребляемой мощностью 1,5 кВт [1, 2]. В процессе диагностирования форсунок в режимах максимальной подачи топлива обнаружены недостатки в силовой части стэнда, а именно – превышение температурного режима работы ЭД. Одной из часто встречающихся причин перегрева является возникновение больших моментов сопротивления на валу электродвигателя, которое вызвано необходимостью создания давления в гидродинамической системе стэнда до 200 МПа. Продолжительная перегрузка вызывает нагрев обмоток двигателя и приводит к ускоренному износу изоляционных материалов, и, как следствие, к снижению срока службы силовой части стэнда [3–6].

Материал и методы. Для правильного выбора мощности силовой установки необходимо замерить потребление электроэнергии на всех режимах работы стэнда. Чтобы определить потребляемую силу тока, необходимо устройство, которое выдержит пусковой ток, поскольку в момент пуска сила тока в 5–6 раз выше номинальной.

Было собрано устройство, выполненное на базе сенсора ACS758. Сенсор может быть ис-

пользован для определения постоянного или переменного тока силой до 100 А. Проходящий через сенсор ток создаёт магнитное поле, которое воспринимается датчиком. Благодаря крайне низкому (100 мкОм) собственному сопротивлению, потери энергии в измеряемой цепи минимальны. Контур питания датчика и подключённая измеряемая цепь гальванически развязаны, таким образом, они не оказывают нежелательного влияния друг на друга. Выводом сенсора является аналоговый сигнал с уровнем напряжения прямо пропорциональным силе тока, с шагом 40 мВ/А.

Результаты исследования. Для снятия осциллограммы фазного тока на ЭД при различных режимах работы стэнда сенсор ACS758 подключается согласно рисунку 1.

С помощью данного устройства были сняты осциллограммы фазного тока (рис. 2, 3) при пуске ЭД, без нагрузки на ЭД и на различных режимах проверки форсунок CR на диагностическом стэнде с диапазоном давления от 50 до 180 МПа с шагом 10 МПа.

В таблице 1 представлены результаты испытаний асинхронного электродвигателя с потребляемой мощностью 1,5 кВт АИР90L6.

По технической характеристике асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором АИР90L6 номинальный ток составляет 4,0 А, максимальный крутящий момент 35 Н·м, коэф-

коэффициент мощности $\cos\varphi = 0,75$. Согласно проведённым испытаниям превышение значения номинального тока для данного ЭД уже происходит при режиме, соответствующем давлению

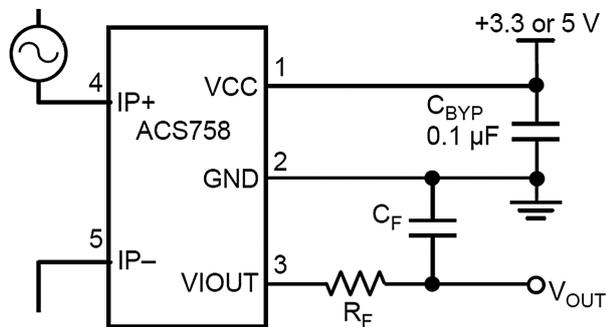


Рис. 1 – Схема последовательного подключения сенсора ACS758 к цепи питания ЭД: 1, 2 – питание 5 В; 3 – выходной аналоговый сигнал (на АЦП микроконтроллера); 4, 5 – подключение измеряемой цепи; C_F , R_F – фильтры сглаживания пульсаций VCC

в топливной системе стэнда 110 МПа (рис. 6). Т.е. в режимах, превышающих данное давление, происходит нарушение температурного режима работы ЭД.

При диагностировании форсунок системы CR согласно тест-планам [7, 8] заводов-изготовителей в режимах Leak test, VL и VE давление в системе варьируется в зависимости от типа форсунки от 100–250 МПа, что превышает максимально допустимые значения для данного ЭД, полученные при проведении исследований. Исходя из результатов расчёта гидродинамической системы стэнда, максимальный крутящий момент, создаваемый ЭД АИР90L6, практически в 2 раза меньше расчётного. Соответственно данный электродвигатель АИР90L6 не удовлетворяет требованиям по номинальному току и крутящему моменту для установки на современные стэнды для проверки форсунок ТПС CR [9].

По данным экспериментальных исследований фазного тока асинхронного ЭД и техническим характеристикам электродвигателей выбираем

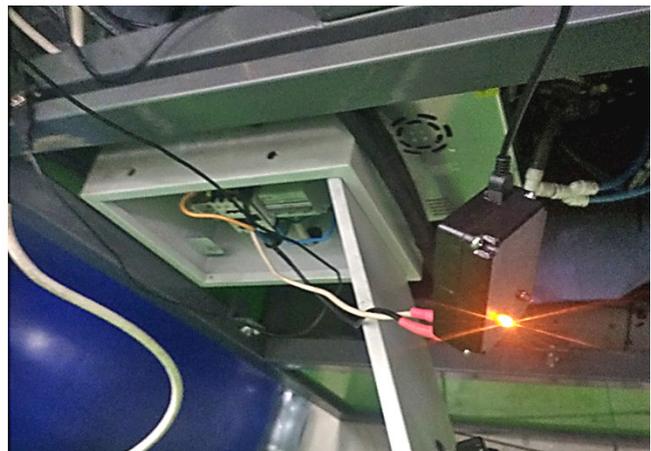
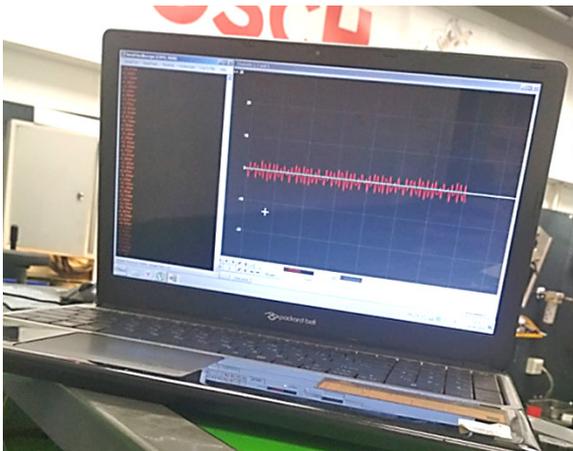


Рис. 2 – Снятие осциллограммы фазного тока на асинхронном трёхфазном электродвигателе с короткозамкнутым ротором АИР90L6

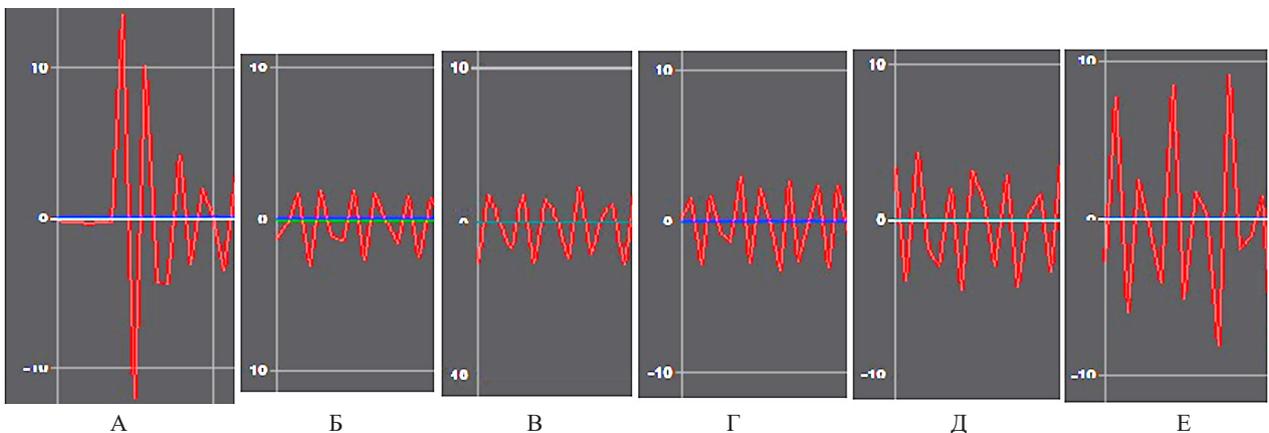


Рис. 3 – Осциллограммы:

А – пускового фазного тока ЭД ($I_{\text{Фmax}} = 13,5$ А); Б – фазного тока ЭД без нагрузки на электродвигатель, ($I_{\text{Фmax}} = 2,6$ А); осциллограммы соответственно при давлении в гидродинамической системе стэнда: В – 50 МПа, ($I_{\text{Фmax}} = 2,8$ А); Г – 80 МПа, ($I_{\text{Фmax}} = 2,9$ А); Д – 120 МПа, ($I_{\text{Фmax}} = 4,4$ А); Е – 180 МПа ($I_{\text{Фmax}} = 10,2$ А)

наиболее подходящий по номинальному току и крутящему моменту электродвигатель АИР112МВ для силовой части стенда. Потребляемая мощность данного ЭД – 4 кВт, номинальный ток составляет 9,75 А, максимальный крутящий момент – 88,4 Н·м, коэффициент мощности – $\cos\varphi=0,76$.

Осциллограммы фазного тока электродвигателя АИР112МВ представлены на рисунке 5. Снятие показаний фазного тока проводилось при пуске ЭД, без нагрузки на ЭД и на различных режимах проверки форсунок СР на диагностическом стенде с диапазоном давления от 50 до 180 МПа с шагом 10 МПа.

1. Результаты испытания электродвигателя АИР90L6 по пиковому значению (ПЗ) осциллограмм фазного тока

Режим испытания	Пусковой ток, А	Без нагрузки на ЭД, А	Давление в гидродинамической системе стенда, МПа													
			50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
ПЗ, А	13,5	2,6	2,8	2,83	2,87	2,9	3,4	3,8	4,1	4,4	4,9	6,1	7,0	8,3	9,5	10,2

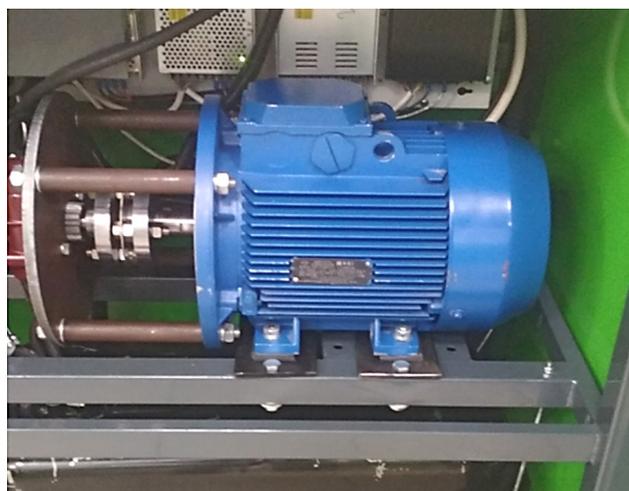
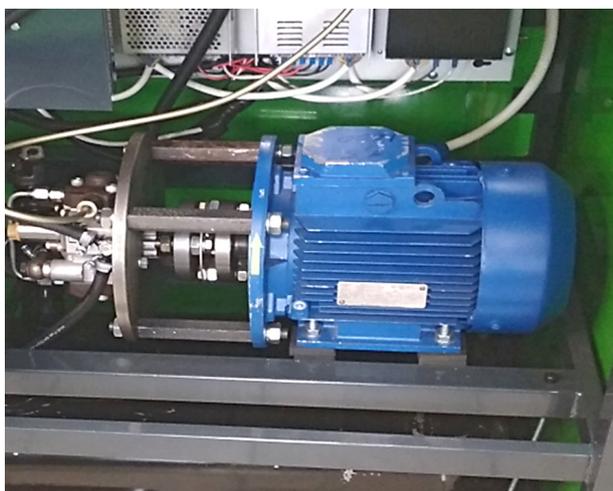


Рис. 4 – Силовая установка стенда:
А – 1,5 кВт АИР90L6; Б – 4 кВт АИР112МВ

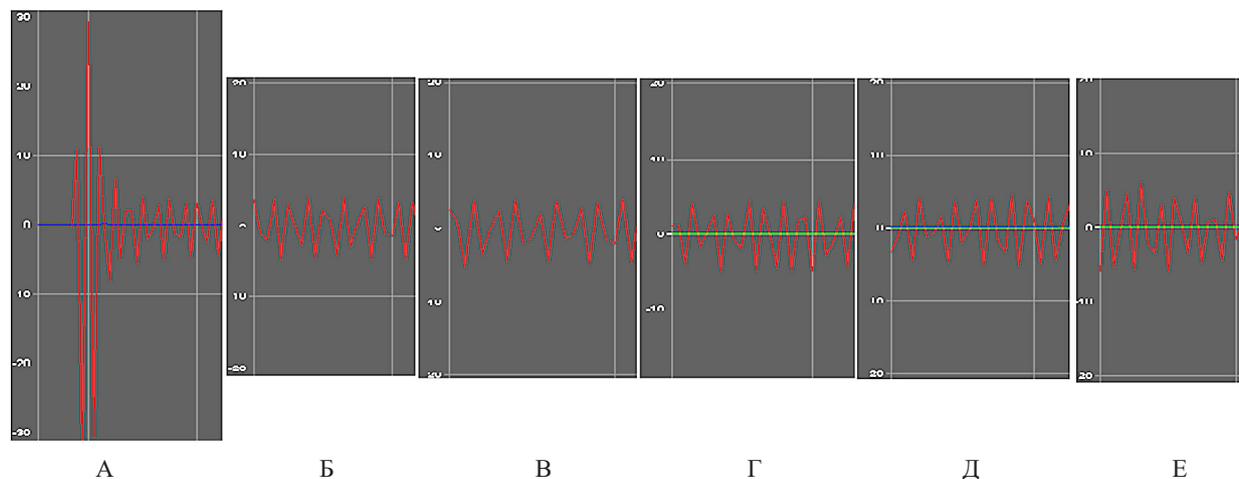


Рис. 5 – Осциллограммы:

А – пускового фазного тока ЭД ($I_{\text{Фmax}} = 29,4$ А); Б – фазного тока ЭД без нагрузки на электродвигатель, ($I_{\text{Фmax}} = 3,9$ А); осциллограммы соответственно при давлении в гидравлической системе стенда: В – 50 МПа, ($I_{\text{Фmax}} = 4,7$ А); Г – 80 МПа, ($I_{\text{Фmax}} = 4,9$ А); Д – 100 МПа, ($I_{\text{Фmax}} = 5,0$ А); Е – 160 МПа ($I_{\text{Фmax}} = 5,9$ А)

2. Результаты испытания электродвигателя АИР112МВ по пиковому значению (ПЗ) осциллограмм фазного тока

Режим испытания	Пусковой ток, А	Без нагрузки на ЭД, А	Давление в гидродинамической системе стенда, МПа													
			50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
ПЗ, А	29,4	3,9	4,7	4,7	4,8	4,9	4,9	5,0	5,1	5,2	5,4	5,6	5,8	5,9	6,1	6,3

Результаты испытаний асинхронного электродвигателя с потребляемой мощностью 4 кВт АИР112МВ сведены в таблицу 2.

На рисунке 6 представлен график зависимости пиковых значений фазного тока от режимов работы стенда (1 – с электродвигателем АИР90Л6, 2 – с электродвигателем АИР112МВ).

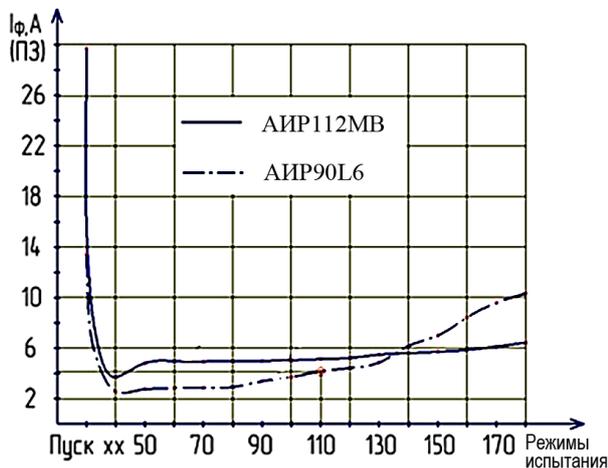


Рис. 6 – График зависимости фазного тока электродвигателя от режимов работы стенда по проверке форсунок ТПС CR

Согласно представленному графику зависимости пиковых значений фазного тока от режимов работы стенда и техническим характеристикам электродвигателя АИР112МВ следует, что данный ЭД удовлетворяет требованиям, предъявляемым к современным стендам для проверки и диагностирования форсунок ТПС типа CR [10].

Проанализируем потребление электроэнергии силового агрегата стенда на различных режимах его работы при использовании электродвигателей, рассмотренных выше.

Потребляемую мощность электродвигателей определим по формуле:

$$P = 3 \cdot U_{\Phi} \cdot I_{\Phi} \cdot \cos(\varphi), \tag{1}$$

где $U_{\Phi} = 220 \text{ В}$ – фазное напряжение на ЭД; $\cos(\varphi) = 0,72$ (для АИР90Л6), $\cos(\varphi) = 0,81$ (для АИР112МВ).

По полученным данным построен график 7 зависимости потребляемой мощности ЭД от давления технологической жидкости в стенде.

По графику 7 видно, что потребление мощности 1,5 кВт электродвигателя меньше до определённого момента, и с повышением давления технологической жидкости в стенде потребляемая мощность резко возрастает, превышая значения потребляемой мощности 4 кВт электродвигателя.

Для повышения энергоэффективности и в целях снижения потребления электроэнергии стенда в конструкцию силовой части стенда с применением ЭД АИР90Л предложено установить маховое колесо. Применение махового колеса способствует снижению пиков потребляемого из сети тока и сглаживанию механической нагрузки на двигатель. Маховое колесо является аккумулятором кинетической энергии, при избытке энергии оно её аккумулирует (запасает), увеличивая свою угловую скорость, т.е. увеличивая свою кинетическую энергию. При недостатке энергии маховое колесо передаёт энергию на вал ТНВД за счёт уменьшения своей кинетической энергии.

Для определения конструктивных размеров махового колеса необходимо знать момент сопротивления ТНВД. С помощью программного комплекса «Впрыск» [11, 12], разработанного МГТУ имени Н.Э. Баумана, для данной гидро-

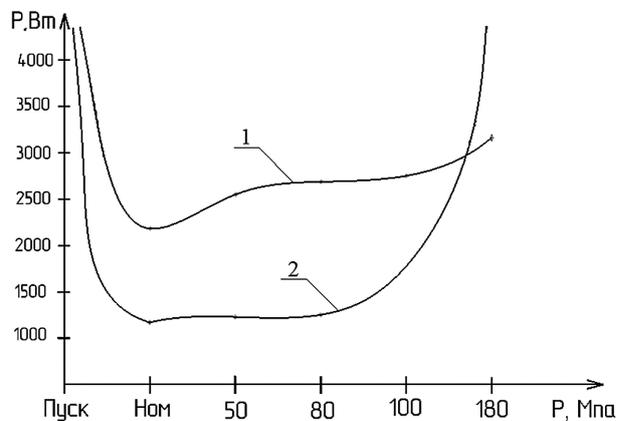


Рис. 7 – Зависимость потребляемой мощности ЭД от давления в ГДС стенда: 1 – ЭД АИР112МВ6У3 (4 кВт); 2 – ЭД АИР90Л (1,5 кВт)

динамической системы стэнда с ТНВД фирмы Denso типа НРЗ был произведён расчёт необходимого крутящего момента на валу привода ТНВД. На рисунке 8 представлен график расчёта крутящего момента на валу привода ТНВД от угла поворота кулачкового вала.

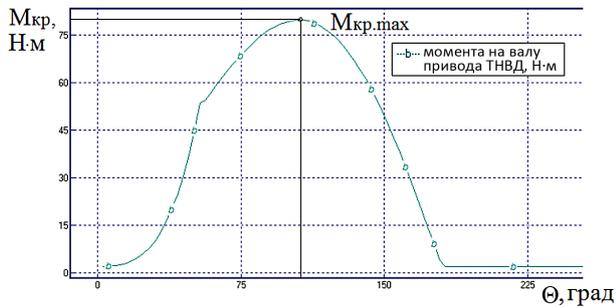


Рис. 8 – График зависимости крутящего момента на валу привода ТНВД $M_{кр}$ от угла поворота кулачкового вала Θ

По графику видно, что максимальное значение крутящего момента $M_{кр.мах}$ составляет 79 Н·м.

Спроектированное и изготовленное маховое колесо было установлено на стэнд (рис. 9) и аналогично были сняты осциллограммы фазного тока ЭД АИР90L и рассчитана потребляемая мощность. Данные сведены в таблицах 3, 4.

На рисунках 10 и 11 показаны сравнительные графики по пиковым значениям фазного тока и потребляемой мощности от давления в ГДС стэнда для ЭД АИР90L и после установки махового колеса.

Вывод. Исходя из данных экспериментальных исследований фазного тока и технических характеристик электродвигателя следует, что при диагностировании форсунок на всех режимах потребление фазного тока находится в допустимых пределах, следовательно, не будет происходить превышения температурного режима ЭД, что и подтвердилось при эксплуатации стэнда.

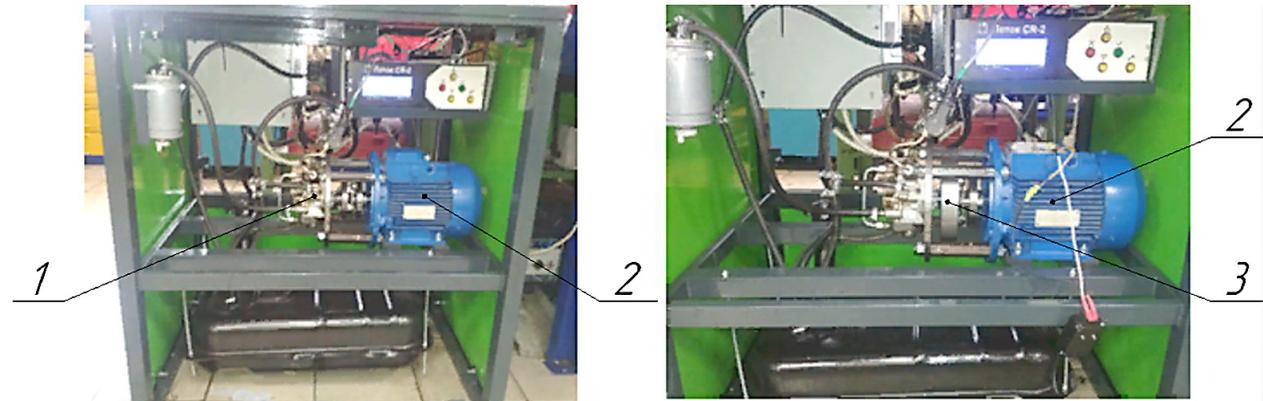


Рис. 9 – Силовая часть стэнда ВТС 101 МЕ:

А – до модернизации; Б – после модернизации; 1 – ТНВД; 2 – ЭД; 3 – маховое колесо

3. Сравнительные данные ЭД по результатам расчёта

Параметр	Значения фазного тока, А		Потребляемая мощность, Вт		
	АИР90L	АИР112МВ	АИР90L	АИР112МВ	
Пусковой ток	13,5	29,4	6415,2	15717,2	
Без нагрузки на ЭД	2,6	3,9	1235,5	2084,9	
Давление в системе стэнда, МПа	50	2,8	4,7	1330,5	2512,6
	80	2,9	4,9	1378,1	2619,5
	120	4,4	5,0	2090,8	2673,0
	180	10,2	5,9	4874	3154,1

4. Сравнительные данные ЭД по результатам эксперимента

Параметр	Значения фазного тока, А		Потребляемая мощность, Вт		
	АИР90L	АИР90L с маховым колесом	АИР90L	АИР90L с маховым колесом	
Пусковой ток	13,5	14,7	6415,2	6985,4	
Без нагрузки на ЭД	2,6	2,8	1235,5	1330,5	
Давление в ГДС стэнда, МПа	50	2,8	2,7	1330,5	1283,1
	80	2,9	2,8	1378,1	1330,5
	120	4,4	3,1	2090,8	1473,1
	180	10,2	4,3	4874	2043,6

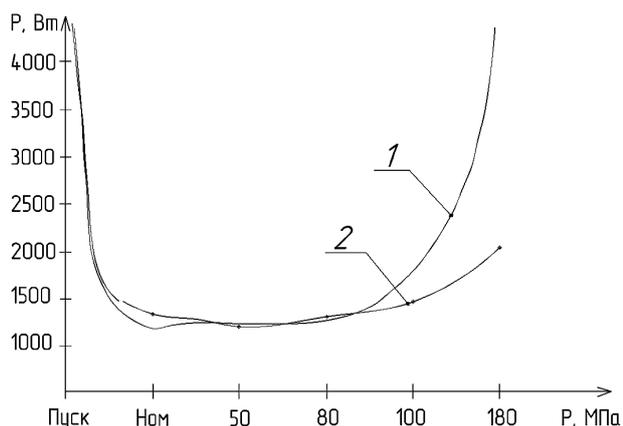


Рис. 10 – Зависимость потребляемой мощности от давления в ГДС стенда с ЭД:
1 – АИР90L; 2 – АИР90L с маховым колесом

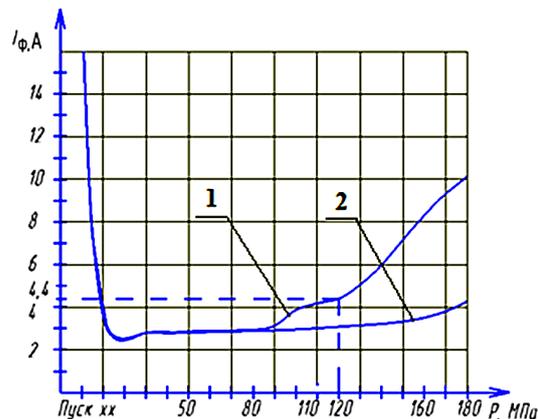


Рис. 11 – График зависимости фазного тока ЭД от давления в ГДС стенда:
1 – до модернизации; 2 – после модернизации

Литература

1. Аипов Р.С., Валишин Д.Е., Леонтьев Д.С. Математическая модель плунжерного насоса с цилиндрическим линейным асинхронным двигателем в приводе // Научный журнал КубГАУ. 2014. № 96 (02). С. 8.
2. Кацман М.М. Электрический привод: учебное пособие. 4-е изд. М.: Академия, 2011. 384 с.
3. Нигматуллин Ш.Ф., Костарев К.В., Карачурин Б.Ш. Совершенствование стенда для проверки дизельных форсунок ВТС-101ме с применением датчика впрыска // Достижения науки и инновации для аграрного производства: матер. национ. науч. конф. Уфа: Башкирский ГАУ. 2016. С. 134–139.
4. Нигматуллин, Ш.Ф., Габдрахимов М.М. Стенд для испытания компонентов топливных систем типа Common Rail // Известия Международной академии аграрного образования. 2013. Вып. 17 (2013) (внеочередной). С. 200–204.
5. Карачурин Б.Ш., Нигматуллин Ш.Ф. Модернизация стенда ВТС-101ме по проверке форсунок топливоподающих систем типа Common Rail // Агрокомплекс-2017: матер. Междунар. науч.-практич. конф. в рамках XXVII Междунар. специализир. выставки. Уфа: Башкирский ГАУ, 2017. С. 209–214.
6. Нигматуллин Ш.Ф., Козеев А.А., Карачурин Б.Ш. Разработка модуля для испытаний насосов высокого давления // Труды ГОСНИТИ. 2017. Т. 127. С. 27–32.
7. Петров А.А., Нигматуллин Ш.Ф. Разработка стенда диагностирования топливных насо-

- сов высокого давления системы Common Rail // Матер. VIII всероссийской научно-практической конференции молодых учёных. Уфа: Башкирский ГАУ. 2015. С. 322–325.
8. Карачурин Б.Ш., Нигматуллин Ш.Ф., Костарев К.В. Модернизация стенда ВТС-101 по проверке форсунок топливоподающих систем типа Common Rail // Инженерное обеспечение в АПК: научный сборник. Уфа: Башкирский ГАУ, 2015. С. 58–62.
9. Карачурин Б.Ш., Нигматуллин Ш.Ф. Разработка стенда ВТС-101м по проверке форсунок топливоподающих систем типа Common Rail // Матер. Всерос. науч.-практич. конф., посвящ. 120-летию со дня рождения заслуженного деятеля науки БАСССР, профессора Александра Петровича Ланге. Уфа, 2016. С. 147–152.
10. Нигматуллин Ш.Ф., Габдрахимов М.М. Стенд для испытания форсунок топливных систем типа Common Rail // Инновационно-промышленный салон. Ремонт. Восстановление. Реновация: матер. IV всерос. науч.-практич. конф. Уфа: Башкирский ГАУ, 2013. С. 104–106.
11. Грехов Л.В. Габитов И.И., Неговора А.В. Конструкция, расчёт и технический сервис топливоподающих систем дизелей: учебное пособие. М: Легион-Автодата, 2013. С. 81.
12. Кулешов А.С., Грехов Л.В. Математическое моделирование и компьютерная оптимизация топливодачи и рабочих процессов двигателей внутреннего сгорания. М.: Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, 2000. 64 с.

Шамиль Файзрахманович Нигматуллин, кандидат технических наук, доцент. ФГБОУ ВО «Башкирский государственный аграрный университет». Россия, 450001, г. Уфа, ул.50-летия Октября, 34, shamil.bosch@mail.ru

Арсений Александрович Козеев, кандидат технических наук, доцент. ФГБОУ ВО «Башкирский государственный аграрный университет». Россия, 450001, г. Уфа, ул. 50-летия Октября, 34, k.arsen.a@mail.ru

Марсель Мусавирович Ямалетдинов, кандидат технических наук, доцент. ФГБОУ ВО «Башкирский государственный аграрный университет». Россия, 450001, г. Уфа, ул. 50-летия Октября, 34, marselcxm@mail.ru

Shamil F. Nigmatullin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor. Bashkir State Agrarian University. 34, 50-let October St., Ufa, Republic of Bashkortostan, 450001, Russia, shamil.bosch@mail.ru

Arseniy A. Kozeev, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor. Bashkir State Agrarian University. 34, 50-let October St., Ufa, Republic of Bashkortostan, 450001, Russia, k.arsen.a@mail.ru

Marsel M. Yamaletdinov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor. Bashkir State Agrarian University. 34, 50-let October St., Ufa, Republic of Bashkortostan, 450001, Russia, marselcxm@mail.ru