



Обоснование диапазона регулирования частот вращения приводов на основе вентильных электродвигателей

Владимир Павленко, Матвей Гинзбург, ООО «РИТЭК-ИТЦ»

Продолжая рассказывать об исследованиях специалистов компании «РИТЭК», отметим, что сегодня на российском рынке предлагаются две принципиально различные конструкции приводов УЭЦН на основе вентильных электродвигателей: с регулируемым диапазоном частоты вращения до 3600 об./мин. и высокооборотные вентильные приводы с диапазоном частот вращения 6000–10000 об./мин. В настоящее время УЭЦН с вентильными приводами с диапазоном регулирования до 3600 об./мин. работают на 420 скважинах нефтедобывающих предприятий «ЛУКОЙЛа» и ОАО «РИТЭК». Объемы использования таких приводов растут.

В данной статье авторы обосновывают выбранный диапазон регулирования частот вращения разработанных и выпускаемых ООО «РИТЭК-ИТЦ» приводов на основе вентильных электродвигателей.

В последние годы в нефтяной отрасли интенсивно растут объемы использования УЭЦН с регулируемым электроприводом на базе серийных асинхронных погружных электродвигателей типа ПЭД и преобразователей частоты. Регулируемый привод в сочетании с системой телеметрии позволяет не только обеспечить поддержание динамического уровня в скважине, но и адаптировать режим работы насоса к изменяющемуся в процессе эксплуатации притоку из пласта. Однако такие приводы не обеспечивают универсального повышения эффективности использования потребляемой энергии, так как в регулируемом электроприводе используются погружные асинхронные электродвигатели с относительно невысоким КПД, при эксплуатации которых в определенных режимах их работы возникают проблемы перегрева ПЭД, приводящие к существенному снижению ресурса установки.

Уменьшение температуры нагрева ПЭД сводится к проблеме повы-

шения КПД двигателя и обеспечения условий теплоотвода.

Для повышения энергетической эффективности УЭЦН необходимы двигатели не только с более высокими КПД, но и с максимально низкими значениями рабочих токов, что позволит существенно сократить потери мощности в кабельных токопроводах.

Наиболее полно этим требованиям отвечает вентильный электродвигатель с постоянными магнитами в роторе [1].

Вентильный электродвигатель не является самодостаточным, так как он не может работать без преобразователя частоты и системы управления, в отличие от асинхронных электродвигателей, которые могут работать как с преобразователем частоты, так и без него. «Вентильные двигатели являются электромеханическими преобразователями энергии, которые сочетают в себе свойства и электрической машины, и интегрированной системы регулируемого электроприво-

да» [2]. Как всякий электродвигатель, он обеспечивает преобразование электрической энергии, которая поступает от питающей сети, в отдаваемую механическую энергию. Как система регулируемого электропривода, вентильный электродвигатель дает возможность осуществлять управление этим процессом в соответствии с особенностями конкретной нагрузки: регулировать частоту вращения, момент, мощность, что существенно повышает технологические возможности при эксплуатации УЭЦН.

Выбор частоты вращения вентильного привода УЭЦН

Возможность реализации любой частоты вращения вентильного электродвигателя ставит перед разработчиком задачу выбора его диапазона регулирования.

Выбор номинальной частоты вращения вентильного электродвигателя для привода УЭЦН и диапазона его регулирования был проведен на



основе экспертной оценки преимуществ и недостатков вентильных приводов и всей установки УЭЦН, работающих в различных диапазонах частот вращения. Оценивалось влияние частот вращения на их ресурсные, энергетические и функциональные характеристики. При проведении оценки влияния частоты вращения на совокупность качественных характеристик приводов и всей установки не ставилась задача проведения сопоставительных расчетов параметров сравниваемых вариантов вентильных электродвигателей, работающих при различных частотах вращения. Проведение таких расчетов требует учета конструктивных особенностей двигателей и использования экспериментальных данных. Анализировались лишь структура потерь и аналитические зависимости, по которым они рассчитываются, что позволило оценить влияние параметров частоты вращения на ресурс оборудования и величины потерь.

Структура потерь в вентильном приводе имеет вид:

$$P_{пр} = P_d + P_k + P_t, \quad (1)$$

где P_d — потери в двигателе;
 P_k — потери в кабеле;
 P_t — потери в трансформаторе.

Массогабаритные, энергетические и ресурсные характеристики серийных УЭЦН определяются в основном номинальной частотой вращения (2910 об./мин.) работающих в составе установки асинхронных погружных электродвигателей.

Увеличение частоты вращения двигателя и насоса позволяет существенно сократить массогабаритные параметры УЭЦН, что, безусловно, повысит эффективность эксплуатации УЭЦН в обсадных колоннах повышенной кривизны и имеющих дефекты. Актуализируется проблема снижения продольных габаритов УЭЦН и в связи с расширением объемов использования высоконапорных многосекционных насосов и

многосекционных электродвигателей большой мощности.

Однако увеличение частоты вращения ведет к снижению ресурса деталей проточной части ЭЦН [3], [4] и изоляции обмотки двигателей из-за более высокого ее перегрева в высокоскоростных двигателях, имеющих меньшую длину и, соответственно, меньшую площадь теплообмена с потоком откачиваемой скважинной продукции [5].

Переход на высокооборотный привод сопряжен с необходимостью создания новых насосов с использованием в них более износостойких материалов, что влечет за собой их существенное удорожание. При всей сложности этой задачи она с технической точки зрения вполне реализуема, в отличие от задачи создания высокоресурсных высокооборотных малогабаритных вентильных электродвигателей из-за напряженного теплового режима их работы.

Структура потерь в электродвигателе имеет вид:

$$P_d = P_m + P_c + P_{мех}, \quad (2)$$

где P_m — потери в меди;
 P_c — потери в стали;
 $P_{мех}$ — потери механические.

Потери в меди практически не зависят от частоты тока, а потери в стали пропорциональны частоте в степени 1,3 [6]. Например, если принять, что сравниваемые двигатели одинаковой мощности имеют равное количество полюсов, то потери в стали двигателей, работающих с частотой вращения 9000 об./мин., будут примерно на 40% больше потерь в стали двигателей, работающих с частотой вращения 3000 об./мин. Снижение потерь в стали в высокооборотных двигателях может быть обеспечено уменьшением толщины статорных листов, что, однако, увеличивает стоимость электрической машины.

В погружных маслозаполненных электродвигателях механические

потери достигают 30% общих потерь, что составляет 3-4% полезной мощности. Такой большой процент механических потерь требует тщательного учета всех факторов, наиболее существенно влияющих на них.

Структура механических потерь в маслозаполненных электродвигателях [7]:

$$P_{мех} = P_n + P_{тр}, \quad (3)$$

где P_n — потери в подшипниках;
 $P_{тр}$ — потери на трение поверхности ротора о масло в зазоре.

При этом потери в подшипниках определяются зависимостью:

$$P_n = P_y + m P_p, \quad (4)$$

где P_y — потери в упорном подшипнике;
 P_p — потери в радиальном подшипнике;
 m — количество радиальных опор в электродвигателе.

В высокооборотном погружном двигателе количество радиальных опор m меньше, чем у низкооборотного равной мощности. Потери в радиальных подшипниках определяются их конструктивными параметрами, применяемыми материалами, частотой вращения, характеристикой масла, его температурой и др. Поэтому при расчете потерь в подшипниках погружных электродвигателей наряду с использованием основных положений гидродинамической теории смазки используются также эмпирические зависимости, полученные на основе экспериментальных данных.

Потери на трение поверхности ротора о масло в зазоре:

$$P_{тр} = 2,25 D^4 L n^3 \lambda 10^{-11}, \quad (5)$$

где D — диаметр пакета ротора;
 L — длина пакета ротора;
 n — частота вращения;
 λ — коэффициент сопротивления движению жидкости в зазоре.

При равных мощностях и одинаковых конструктивных параметрах



двигателей соотношение длин пакетов ротора в зависимости от частоты вращения определяется выражением:

$$L_2 = L_1 \frac{n_1}{n_2}, \quad (6)$$

где L_1 — длина пакета ротора двигателя, работающего с частотой вращения n_1 ;

L_2 — длина пакета ротора двигателя, работающего с частотой вращения n_2 .

С учетом (5) и (6) можно записать

$$\frac{P_{2тр}}{P_{1тр}} = \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2, \quad (7)$$

где $P_{1тр}$ — гидромеханические потери на трение пакета ротора о масло при частоте вращения n_1 ;

$P_{2тр}$ — гидромеханические потери на трение пакета ротора о масло при частоте вращения n_2 .

Из формулы (7) следует, что при равных мощностях гидромеханические потери на трение ротора о масло в двигателях, работающих с большей частотой вращения, выше, чем в двигателях с меньшей частотой вращения. Например, если $n_1 = 3000$ об./мин., а $n_2 = 9000$ об./мин., то гидромеханические потери в двигателе, работающем с частотой вращения 9000 об./мин., в 9 раз выше, чем в двигателе, работающем с частотой вращения 3000 об./мин.

Наибольшее влияние на гидромеханические потери оказывает диаметр роторного пакета.

С уменьшением диаметра ротора, позволяющим снизить гидромеханические потери, для обеспечения заданной мощности необходимо увеличить длину его пакета, что, в свою очередь, ведет к росту гидромеханических потерь. Однако, если предположить, что при создании высокооборотного двигателя за счет конструктивных решений и применения магнитов с высокими удельными энергиями удалось, например, уменьшить диаметр ротора на 20% без увеличения его

длины, то и в этом случае гидромеханические потери в двигателе, работающем с частотой вращения 9000 об./мин., с диаметром ротора $D_2 = 0,8D_1$, будут в три раза выше, чем в двигателе с диаметром ротора D_1 , работающем с частотой вращения 3000 об./мин.

Вентильные электродвигатели при равных с асинхронными мощностях и напряжениях имеют меньшие значения рабочих токов. При увеличении частоты вращения и связанным с этим ростом потерь, при равных мощностях рабочий ток высокоскоростного вентильного электродвигателя будет выше, чем у вентильного электродвигателя с меньшей частотой вращения.

Несинусоидальный характер токов в системе вентильного привода и повышенная частота основной гармоники требует оценки возможных дополнительных потерь, как в повышающем трансформаторе, так и в проводниках токоподвода. Возможное увеличение потерь в трансформаторе от влияния высших гармоник не превышает 5-8% [8], причем с повышением частоты тока потери возрастают. В вентильных приводах для УЭЦН, работающих с частотой тока до 200 Гц, возможно использование стандартных трансформаторов типа ТМПН с двух и более кратным запасом по габаритной мощности относительно мощности ВД. Потери от влияния высших гармоник в трансформаторе, работающего с частотой тока до 200 Гц будут ниже, чем в трансформаторах, работающих с частотой тока до 500 Гц.

Потери напряжения от высших гармоник в токопроводе не превышают 3-5% от потерь на основной гармонике [9], поэтому снижение энергетических показателей системы трансформатор ТМП — кабельная линия КБП при работе с частотой тока до 200 Гц будет ниже, чем в системе трансформатор — кабельная линия при работе с частотой тока 500 Гц.

Проведенная оценка преиму-

ществ и недостатков вентильных приводов и всей установки УЭЦН, работающих в различных диапазонах частот вращения, показала, что по энергетическим и ресурсным параметрам высокоскоростные вентильные электродвигатели уступают двигателям, работающим с меньшей частотой вращения. Недостаточно изучен также вопрос работы насосов при повышенных частотах вращения в реальной водонефтегазожидкостной среде.

Поставленная задача создания энергоэффективного высоконадежного вентильного привода, который сумеет в перспективе заменить асинхронные электродвигатели ПЭД в установках УЭЦН, по нашей оценке, сегодня не может быть решена на базе высокоскоростных двигателей.

Уменьшение продольных габаритов УЭЦН за счет повышения частоты вращения насоса и двигателя приведет к снижению его энергетических и ресурсных характеристик и существенному повышению цены такой установки. Высокоскоростные установки могут быть использованы с учетом конъюнктурных обстоятельств, когда высокая цена установки, ее более низкие энергетическая эффективность и ресурс обеспечивают экономический результат при эксплуатации скважин таким оборудованием. Исходя из проведенного анализа был принят к разработке привод УЭЦН на основе вентильного электродвигателя типа ВД с номинальной частотой вращения 3000 об./мин. и с диапазоном регулирования 500-3600 об./мин.

Частота вращения 2910 об./мин. — это принятая в России частота вращения насоса, двигателя и гидрозакоры, при которой обеспечивается ресурс оборудования, указанный в документации разработчика и подтвержденный результатами многолетней эксплуатации. Верхнее значение частоты вращения — 3600 об./мин. — это номинальная частота

вращения насосов, выпускаемых фирмами США, в которых основные конструктивные решения и применяемые материалы идентичны конструкции и материалам российских УЭЦН, поэтому серийные насосы и гидрозащита могут работать при этой частоте вращения без снижения ресурса.

Принятый диапазон частоты вращения до 3600 об./мин. позволяет:

- применять в составе УЭЦН с вентильным приводом серийные насосы, гидрозащиту, кабельные муфты, а также максимально унифицировать с серийными ПЭД конструкцию вентильных электродвигателей ВД и технологию их изготовления и ремонта;

- компенсировать неточности расчетов параметров эксплуатации УЭЦН и подбора оборудования, которые имеют место при использовании даже самых совершенных программ подбора, а также оптимизировать работу системы «насос–скважина» в случае изменений параметров работы пласта.

Возможность реализации поставленных задач обеспечивает разработанный ООО «РИТЭК-ИТЦ» типоразмерный ряд приводов УЭЦН,

состоящий из станций управления типа «РИТЭК» и вентильных электродвигателей ВД [4].

С 2006 г. выпускаются приводы на основе ВД с системой телеметрии, позволяющей поддерживать заданный динамический уровень в скважине за счет автоматического изменения частоты вращения ВД по давлению на приеме насоса, а также обеспечить защиту УЭЦН по температуре в полости двигателя и вибрации.

Энергетическая эффективность вентильных приводов УЭЦН с диапазоном регулирования до 3600 об./мин.

Нагрузочные, энергетические и тепловые характеристики вентильных приводов исследовались на специально спроектированном и смонтированном на опытно-экспериментальной базе ООО «РИТЭК-ИТЦ» стенде, структурная схема которого представлена на рис. 1.

Стенд предназначен для проведения экспериментально-исследовательских работ, отработки и испытаний электроприводов с вентильными электроприводами мощностью до 160 кВт.

Стенд состоит из:

- модели насоса в виде нагрузочной асинхронной машины с регулируемой нагрузкой и системой рекуперации электроэнергии;
- пульта управления стендом с информационным табло;
- станции управления «РИТЭК» для испытываемых вентильных двигателей;
- вентильного электродвигателя для испытаний и отработки станций управления;
- силового повышающего трансформатора;
- натурального эквивалента силового кабеля, питающего погружной электродвигатель;
- физической модели окружающей среды испытываемого электродвигателя (вода с регулируемой температурой);
- цифровой системы снятия параметров электродвигателя и станции управления с последующей обработкой и регистрацией.

Сочленение рабочих валов вентильного двигателя и нагрузочной машины осуществляется посредством упругой муфты, на которой установлен прецизионный быстродействующий датчик момента. В качестве нагрузочного устройства используется асинхронная машина. Согласование скорости вращения испытываемых электродвигателей и нагрузочной машины и задание необходимого момента осуществляются с помощью преобразователя частоты, при этом асинхронная машина работает в режиме генератора, а преобразователь — в режиме рекуперации, отдавая мощность в трехфазную сеть 380В 50 Гц. В сеть возвращается 65-70% потребляемой мощности, при этом качество возвращаемой энергии соответствует требованию ГОСТ 13109-97 «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения».

Величина тормозящего момента задается потенциометром, измеряется датчиком момента и контролируется на пульте управления.

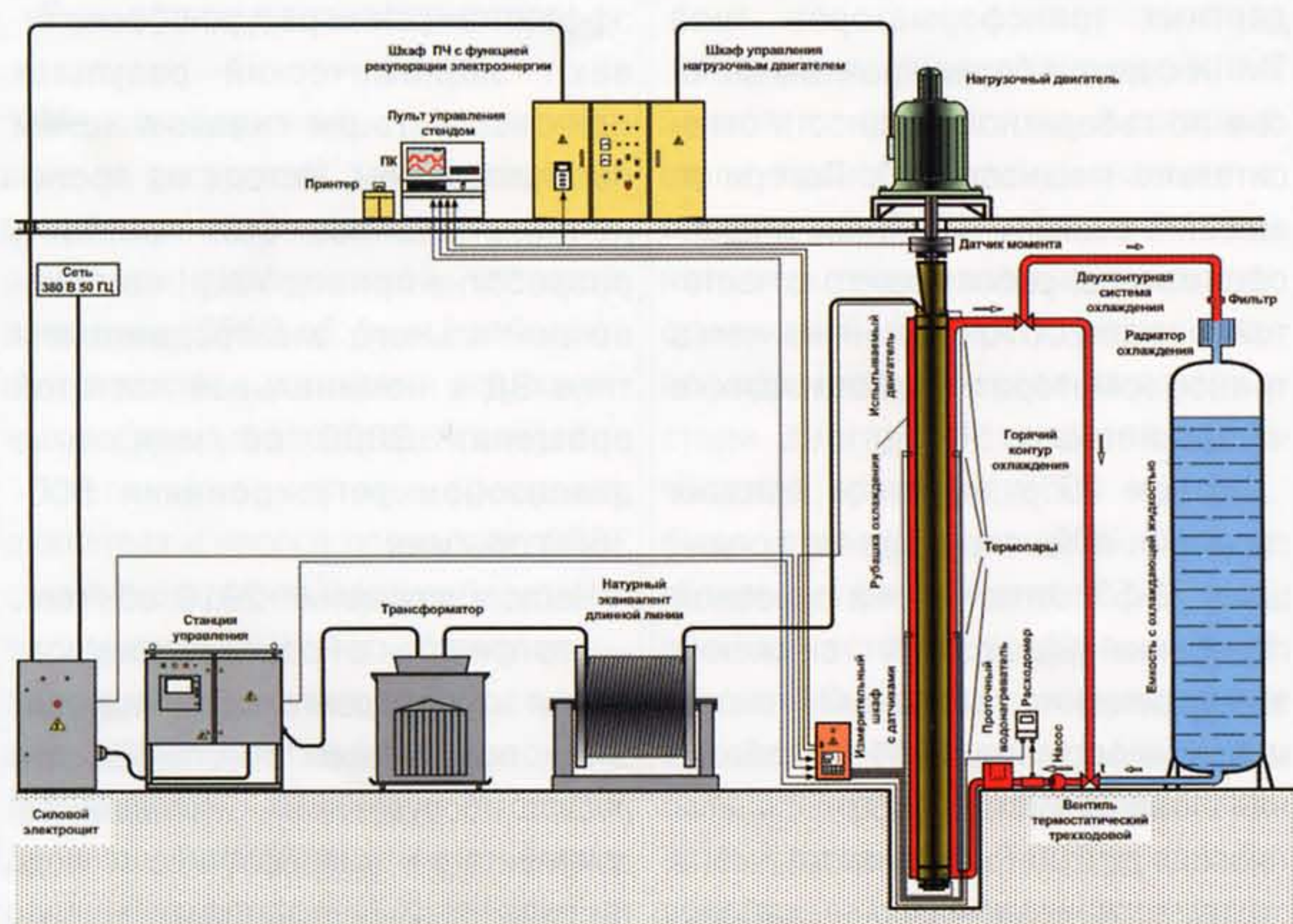
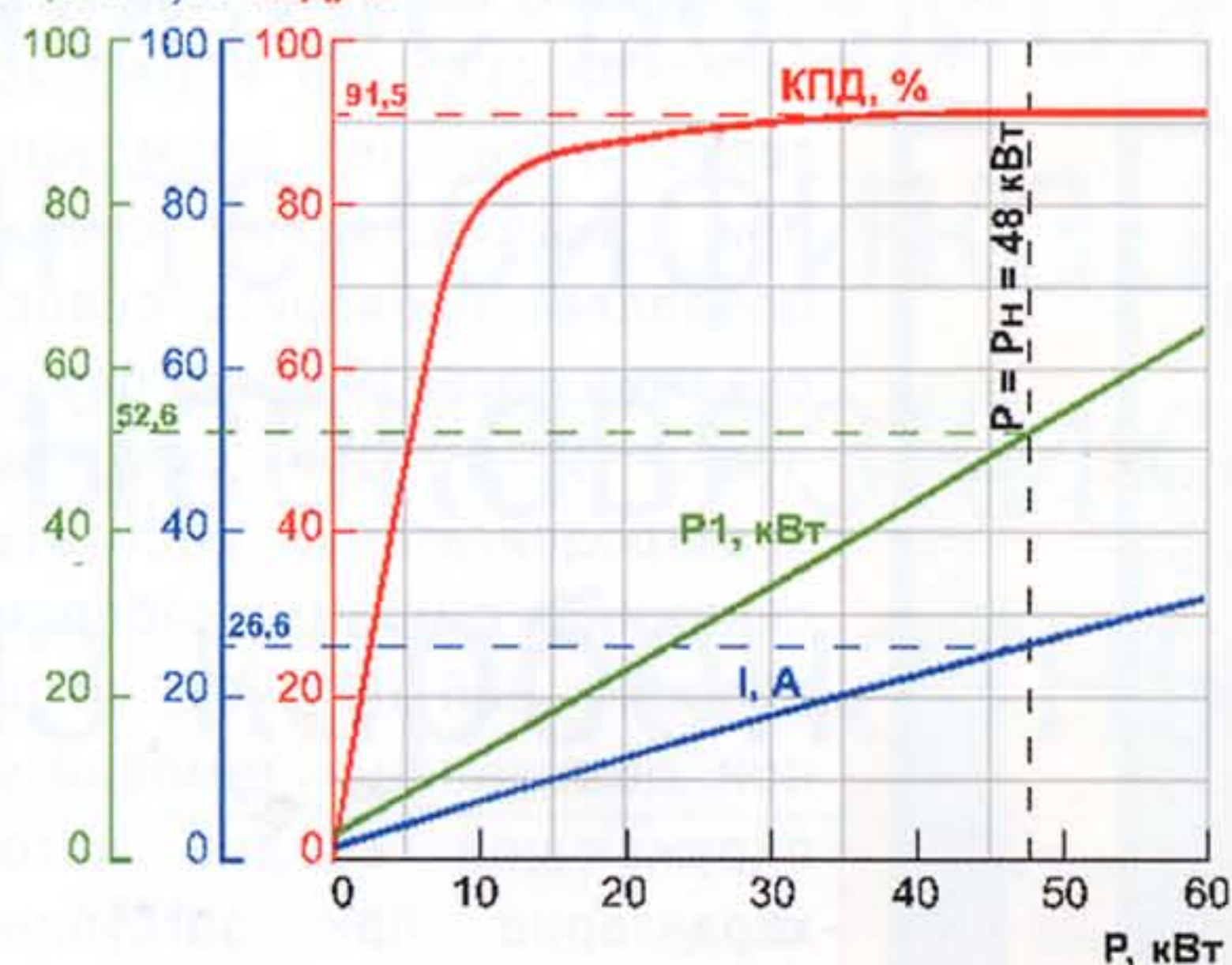


Рис. 1. Структурная схема стенда для проведения исследований вентильных приводов погружных насосов



P1, кВт I, A КПД, %



P1, кВт I, A КПД, %

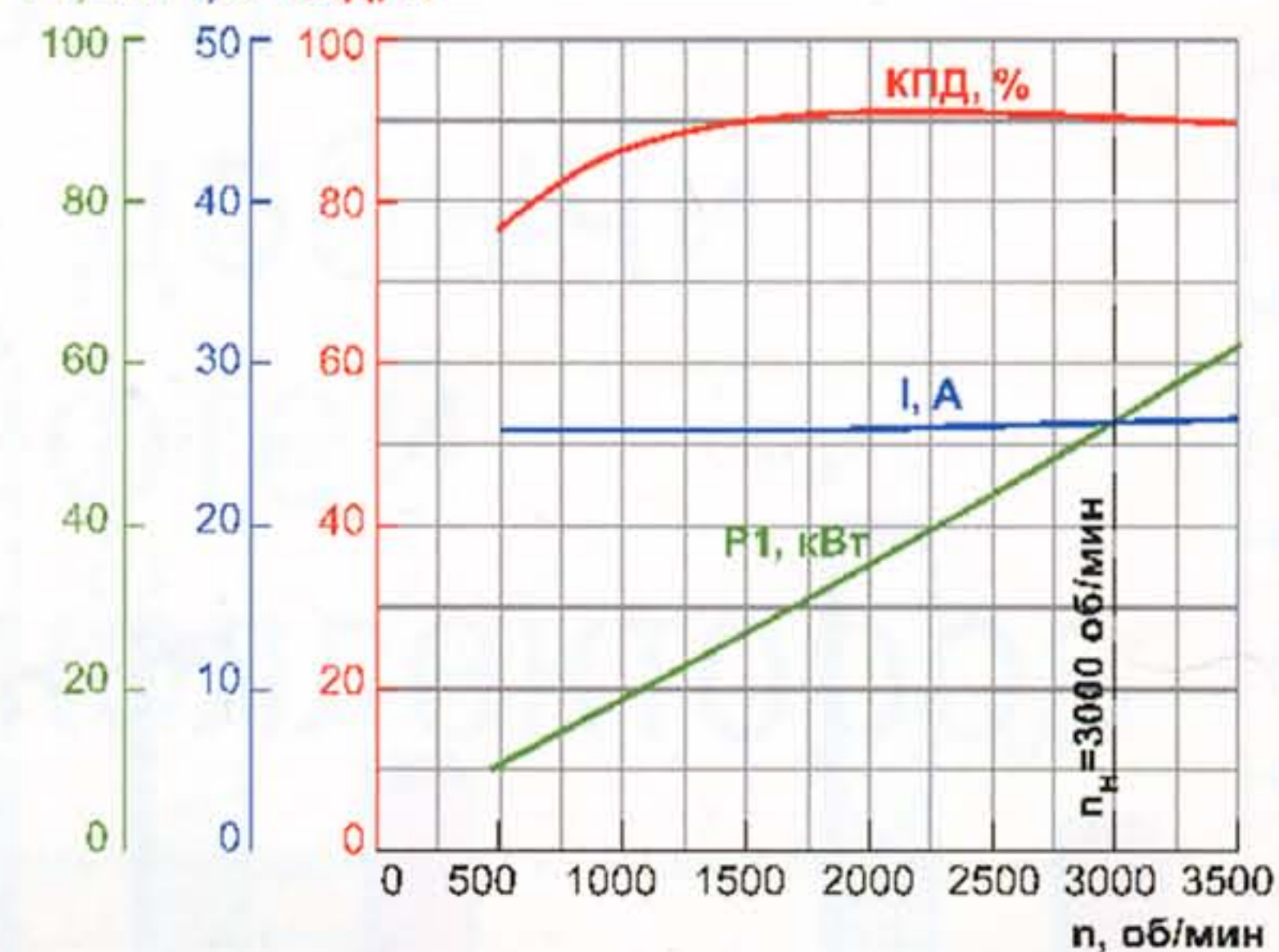


Рис. 2. Рабочие характеристики вентильного электродвигателя ВД48-117В5

Физическое моделирование окружающей среды испытываемого электродвигателя осуществляется прокачиванием регулируемого объема жидкости с регулируемой температурой через полость, образуемую между корпусом электродвигателя и кожухом системы охлаждения, что позволяет определять предельные мощности,

нагрузки и перегревы электродвигателя при различных скоростях омываемого двигателя потока. Питание электродвигателя от повышающего трансформатора осуществляется по погружному кабелю с возможностью подбора различных сечений и длин кабельных линий.

Измерение параметров электро-

двигателя и станции управления в различных режимах работы, их визуализация на мониторе и регистрация результатов измерений ведется в реальном масштабе времени. Программное обеспечение реализовывает функции автоматического управления по выбранной легенде, обработку информации, поступающей с датчиков, хранение

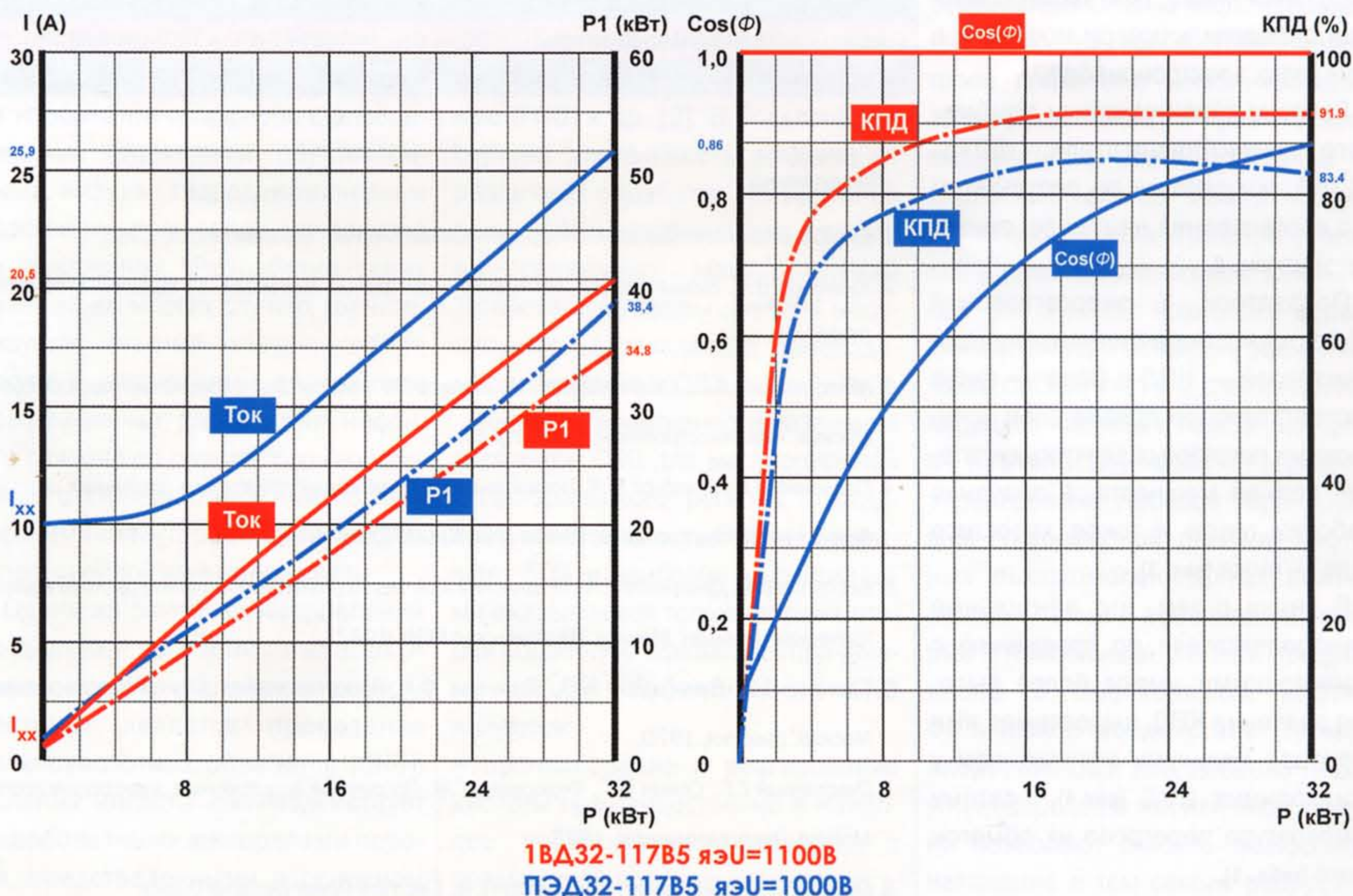


Рис. 3. Рабочие характеристики вентильного ВД32-117В5 и асинхронного ПЭД32-117В5 электродвигателей

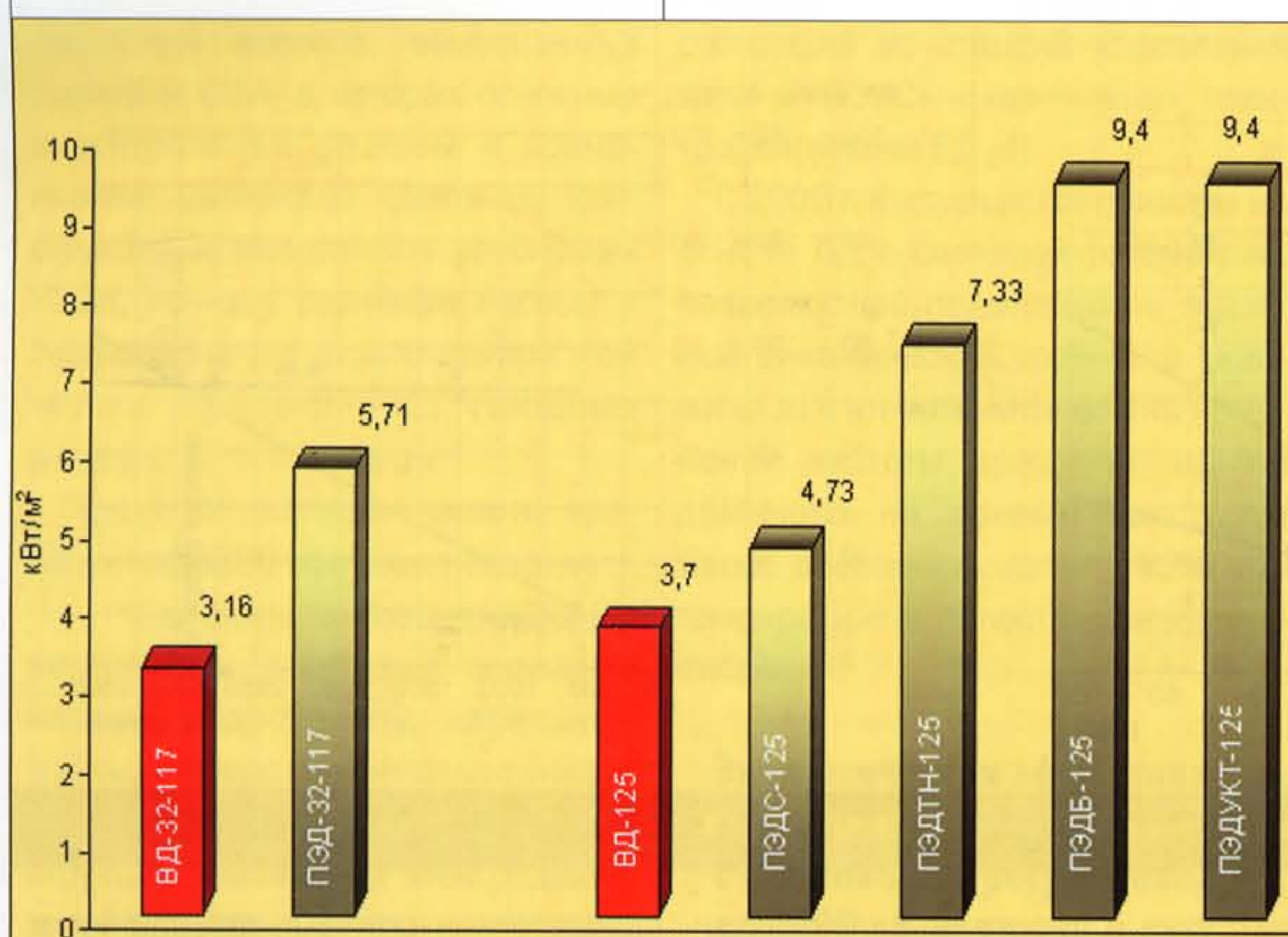


Рис. 4. Удельное тепловыделение электродвигателей ВД и ПЭД

только более высокий ресурс по сравнению с асинхронными двигателями ПЭД, но и расширяет технологические возможности при эксплуатации скважин: позволяет проводить освоение скважин после ремонта без остановки УЭЦН для охлаждения электродвигателя, работать в скважинах с малыми отборами и нестабильной подачей, а также при повышенных температурах окружающей среды, которая характерна при заглублении УЭЦН с целью форсирования отбора продукции.

Результаты реализации этих и других преимуществ вентильных приводов будут опубликованы в очередном номере журнала.

полученных результатов в базе данных компьютера.

Возможность замера электрических параметров на входе и выходе каждого звена установки (станция управления, трансформатор, кабельная линия, двигатель) позволяет определить потери мощности в этих узлах электропривода.

Рабочие характеристики вентильного электродвигателя ВД48-117В5, полученные по результатам его исследования на стенде, приведены на рис. 2.

Показатели энергетической эффективности вентильных электродвигателей — КПД и $\cos\phi$ — выше соответствующих показателей асинхронных погружных электродвигателей равной мощности, а значения рабочих токов и токов холостого хода — ниже (рис. 3).

В связи с тем, что вентильные электродвигатели по сравнению с асинхронными имеют более высокие значения КПД, выделяемая ими тепловая мощность меньше, чем у асинхронных ПЭД (рис. 4), поэтому температура перегрева их обмоток ниже (табл. 1).

Малые значения температур перегрева вентильных электродвигателей ВД обеспечивает не

Табл. 1. Температура перегрева обмоток ВД и ПЭД

Показатель	ВД32	ПЭД32
КПД, %	91,9	84,5
$\cos\phi$	0,99	0,86
Напряжение, В	1100	1000
Рабочий ток, А	20,5	26,0
Удельное тепловыделение, кВт/м²	3,16	5,71
Скорость охлаждающей жидкости, м/с	0,04	0,08
Перегрев обмотки, °С	25	40

Литература

1. Бут Д.А. Бесконтактные электрические машины. Москва, Высшая школа, 1985.
2. Кузнецов В.А., Кузьмичев В.А. Вентильно-индукторные двигатели. М. Издательство МЭИ, 2003.
3. Животовский Л.С., Смойловская Л.А. Лопастные насосы для абразивных гидросмесей. Москва, «Машиностроение», 1978, стр.87.
4. Павленко В.И., Гинзбург М.Я. Новый высокоэффективный привод для погружных центробежных и винтовых насосов. «Технологии ТЭК» №3, 2004.
5. Беспалов В.Я., Дунайкина Е.А., Мощинский Ю.А. Нестационарные тепловые расчеты в электрических машинах. Москва, Издательство МЭИ, 1987.
6. Сергеев П.С., Виноградов Н.В., Горяинов Ф.А. Проектирование электрических машин. Москва, Энергия, 1970.
7. Счастливый Г.Г., Семак В.Г., Федоренко Г.М. Погружные асинхронные электродвигатели. Москва, Энергоатомиздат, 1983.
8. Dugan R.C., Mc granaghan M. F., Beaty H. W. Electrical Power Systems Quality.
9. Львов А.П. Электрические сети повышенной частоты. Энергоиздат, 1981.