

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГРЕБНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОДВОДНОГО АППАРАТА

В.Е. Горнак, В.В. Костенко

Институт проблем морских технологий ДВО РАН

ВВЕДЕНИЕ

Соответствие между гребным движителем и электроприводом по номинальным оборотам и моменту определяет эффективность движительной установки подводного аппарата. В статье получены аналитические выражения, описывающие работу бесколлекторного 3-фазного электродвигателя типа ДБМ. Коэффициенты этих выражений определены в результате лабораторных испытаний электрической машины в генераторном режиме. Предложена методика расчета КПД рассматриваемой машины. Рассматривается методика определения КПД блока управления двигателем (БУД).

По заказу ИПМТ ДВО РАН для привода гребных движителей ЗАО «Машиноаппарат» разработано бесконтактные электродвигатели типа ДБМ 70-1.1-1.3-3, имеющие следующие характеристики: амплитудное значение фазных напряжений – 27 В, номинальная частота вращения – 1000 об/мин, номинальная мощность на валу – 110 Вт. Для оптимизации схемотехнических решений при проектировании БУД и точного формирования технического задания на разработку гребного винта необходимо получить аналитические выражения, описывающие работу двигателей во всем диапазоне регулирования скорости при нагрузках на валу от минимальных до перегрузочных. Двигатели серии ДБМ являются синхронными маши-

нами, имеющими статор с 3-фазной обмоткой и ротор с постоянными магнитами. Известно [1,2], что такие машины являются обратимыми – могут работать как в качестве генератора, так и в режиме электродвигателя. Отсутствие эталонного блока управления, формирующего синусоидальные 3-фазные напряжения под управлением датчика положения ротора, предопределило выбор генераторного режима работы ДБМ для получения необходимых экспериментальных данных.

■ Методика определения параметров двигателя ДБМ в генераторном режиме

Для испытания ДБМ в режиме генератора требуются регулируемый источник постоянного тока мощностью до 500 Вт, приводной электродвигатель постоянного тока и 3-фазная остататная нагрузка. Фотография измерительного стенда приведена на рис. 1.

В качестве приводного использовался электродвигатель типа ДПУ87-250-3-48, электродвижущий момент на валу которого регулировался изменением напряжения источника постоянного тока Б5-71. С помощью подключенных к 3-фазной обмотке статора реостатов изменялась нагрузка на генератор. При этом сопротивления реостатов изменялись синхронно для обеспечения максимальной симметричности фазных токов $I_1 = I_2 = I_3$. Известно [2], что при вращении ротора с постоянными магнитами в обмотке статора наводится электродвижущая сила (ЭДС) E_ϕ , пропорциональная частоте вращения вала

$$E_\phi = C_e \cdot f_\omega, \quad (1)$$

где: C_e – коэффициент пропорциональности действующего значения ЭДС, приведенной к фазе; f_ω – частота вращения вала, Гц. В ходе испытаний ДБМ70-1.1-1.3-3 на холостом ходу (без нагрузочных реостатов) было установлено, что $C_e = 0,6056$ В/Гц.



Рис. 1. Стенд для исследования генераторного режима ДБМ

При включении нагрузочных реостатов фазные напряжения на выходе генератора U_ϕ будут меньше величины ЭДС генератора E_ϕ на величину активных потерь в обмотке статора $\Delta U_{\phi R}$ и на величину, обусловленную электромагнитными потерями $\Delta U_{\phi \text{ЭМ}}$:

$$U_\phi = E_\phi - \Delta U_{\phi R} - \Delta U_{\phi \text{ЭМ}}.$$

Если величину падения на активном сопротивлении обмотки R_ϕ можно рассчитать по формуле

$$\Delta U_{\phi R} = R_\phi \cdot I_\phi,$$

то расчет остальных потерь не представляется возможным. Поэтому они были найдены опытным путем.

С этой целью были выполнены измерения на разных оборотах выходного вала и различных нагрузках на генератор. При этом регистрировались следующие параметры:

- U_ϕ – действующее значение фазного напряжения, Вт
- I_ϕ – действующее значение фазного тока, А.

В ходе обработки результатов стендовых испытаний электродвигателя ДБМ70-1.1-1.3-3 в режиме генератора для фазного напряжения была установлена следующая зависимость:

$$U_\phi = C_e \cdot f_s - R_\phi \cdot I_\phi - K_{\phi 1} \cdot I_\phi^2 - K_{\phi 2} \cdot I_\phi^3. \quad (2)$$

На рис. 2 показаны рассчитанные по формуле (2) и экспериментальные зависимости действующего значения фазного напряжения от действующего значения фазного тока в диапазоне оборотов вала 300 – 1000 об/мин для $C_e=0,6056$ Вт/Гц, $R_\phi=0,48$ Ом, $K_{\phi 1}=0,016$ Вт/А² и $K_{\phi 2}=0,05$ В.

В силу обратимости исследуемой электрической машины действующее значение фазного напряжения ДБМ в двигательном режиме можно определить по формуле:

$$U_\phi = E_\phi + \Delta U_\phi = 0,6056 \cdot f_s + 0,48 \cdot I_\phi + 0,016 \cdot I_\phi^2 + 0,05 \cdot I_\phi^3. \quad (3)$$

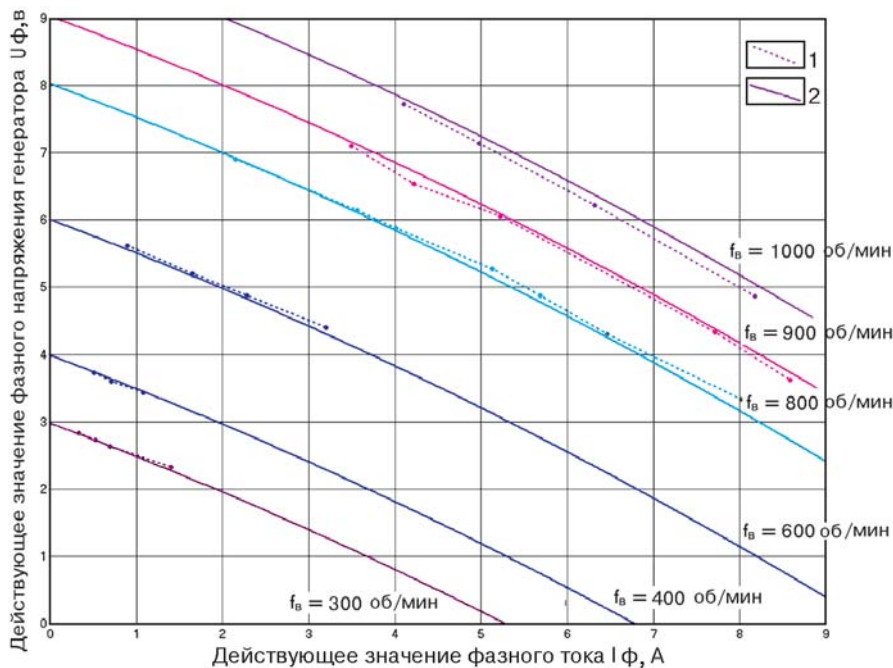


Рис. 2. Зависимости фазного напряжения генератора U_ϕ от тока I_ϕ : 1 – эксперимент, 2 – расчет по формуле (2)

Мощность на валу двигателя определяется очевидным выражением:

$$P_e = 3 \cdot E_\phi \cdot I_\phi - P_{xx} = 3 \cdot C_e \cdot f_s \cdot I_\phi - P_{xx}, \quad (4)$$

где P_{xx} – мощность механических потерь двигателя, обусловленных трением в опорах качения. Для исследования была принята следующая зависимость этих потерь от частоты:

$$P_{xx} = K_1 \cdot f_s + K_2 \cdot f_s^2, \quad (5)$$

где $K_1=0,208$ Вт/Гц и $K_2=0,0067$ Вт/Гц² – коэффициенты пропорциональности, определенные в рабочем диапазоне частот вращения вала методом подбора по результатам эксперимента. Расхождение между расчетным и экспериментальным значением потерь не превышает $\pm 0,5\%$.

Потребляемая двигателем электрическая мощность может быть определена по следующей формуле [2]:

$$P_{эл} = 3 \cdot U_\phi \cdot I_\phi. \quad (6)$$

С учетом выражений (1-6) получим следующую формулу для вычисления КПД ДБМ:

$$\eta_{ДБМ} = \frac{P_e}{P_{эл}} = \frac{3E_\phi \cdot I_\phi - P_{xx}}{3 \cdot U_\phi \cdot I_\phi} = \frac{3 \cdot C_e \cdot f_s \cdot I_\phi - (K_1 \cdot f_s + K_2 \cdot f_s^2)}{3 \cdot U_\phi \cdot I_\phi}. \quad (7)$$

Зафиксировав частоту вращения вала, можно найти решение формулы (7), изменяя значения фазного тока в диапазоне от 0 до максимально допустимого для нашего двигателя. На рис. 3 представлены графики изменения КПД в зависимости от мощности на валу для оборотов вала от 300 до 1000 об/мин. В ходе расчета аргумент I_ϕ функции (7) изменялся в диапазоне 0 – 10 А. Пунктиром здесь показаны графики, подтвержденные экспериментом.

■ Оценка влияния мер герметизации на параметры двигателя

Использование электродвигателей на многокилометровых глубинах Мирового океана предопределяет заполнение их внутренних полостей масляно-керосиновой смесью и как следствие уплотнение выходного вала с помощью манжетты. Ввиду малости диаметра ротора и относительно небольших скоростей его вращения (1000-1200 об/мин) силы

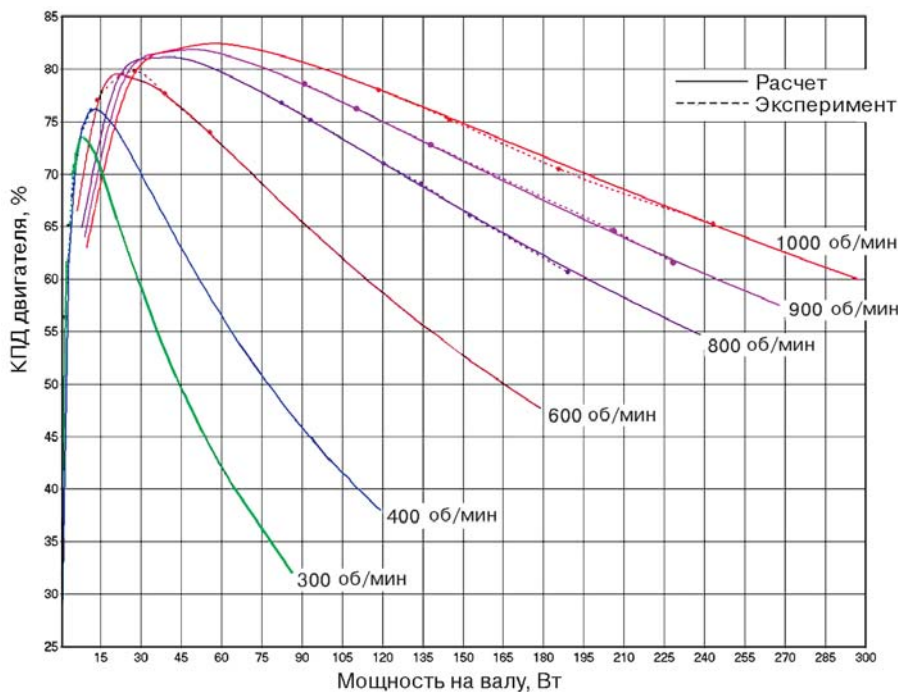


Рис. 3. Зависимость КПД сухого варианта электродвигателя ДБМ 70-1.1-1.3-3 от мощности на валу

жидкостного трения незначительны. Использование же манжеты заметно увеличило потери на трение. Предварительные стендовые испытания показали, что в погружном варианте при расчете потерь в двигателе с достаточной степенью точности можно принять:

$$P_{xx} = K_{xx} \cdot f_e, \quad (8)$$

где $K_{xx} = 0,5866$ Вт/Гц – коэффициент пропорциональности, определенный экспериментально для погружного варианта двигателя (с манжетой и разгружающей жидкостью). С учетом изменившейся зависимости потерь мощности от частоты вращения вала (8) к расчету КПД было принято следующее выражение:

$$\eta_{ДБМ} = \frac{P_e}{P_{эл}} = \frac{3E_\phi \cdot I_\phi - P_{xx}}{3 \cdot U_\phi \cdot I_\phi} = \frac{3 \cdot C_e \cdot f_e \cdot I_\phi - K_{xx} \cdot f_e}{3 \cdot U_\phi \cdot I_\phi}. \quad (9)$$

Результаты расчета приведены на рис. 4. Анализ графиков показывает, что КПД погружного варианта электродвигателя в диапазоне от номинальной мощности 110 Вт до мощности

двойной перегрузки уменьшился на 3-5 %.

Выполненные расчеты показали, что двигатели типа ДБМ70-1.1-1.3-3 сохраняют КПД до 70% при перегрузке на валу до 200 Вт. Это почти втрое превышает показатели ранее использовавшихся коллекторных двигателей постоянного тока типа ДПУ87-75.

Методика определения КПД блока управления двигателем

Очевидно стремление разработчиков к минимизации потерь схемы управления гребного электропривода. Особенно важно и ответственно решение этой задачи при проектировании движительной установки автономных ПА. При этом крайне важно знать КПД БУД. Для определения этого показателя авторами статьи была предложена методика расчета электрической мощности потребления ДБМ $P_e = 3 \cdot I_\phi \cdot U_\phi$ не прямыми измерениями I_ϕ и U_ϕ , а косвенно, через мощность на валу P_e , измеряемую на нагрузочном стенде, функциональная схема которого приведена на рис. 5.

Генератор нагружает вал приводного ДБМ мощностью, которую можно рассчитать по формуле:

$$P_e^2 = C_{e2} \cdot f_e \cdot I_z + K_{mp} \cdot f_e, \quad (10)$$

где $C_{e2} = 1,791$ В/Гц – коэффициент пропорциональности действующего значения ЭДС, а $K_{mp} = 2,325$ Вт/Гц – коэффициент потерь на трение в опорах нагрузочного двигателя Hartha ТУР 1278,7 ($M_{ном} = 4$ Нм, $n_{ном} = 1200$ об/мин, $U_{ном} = 48$ В, $I_{ном} = 15$ А, $P_{ном} = 500$ Вт). С другой стороны, эта мощность равна мощности на валу приводного ДБМ (4). Для погружного варианта двигателя, нагруженного генератором, очевидно соотношение

$$P_e = 3 \cdot C_e \cdot f_e \cdot I_\phi - K_{xx} \cdot f_e = C_{e2} \cdot f_e \cdot I_z + K_{mp} \cdot f_e,$$

которое можно разрешить относительно фазного тока двигателя I_ϕ :

$$\frac{C_{e2} \cdot f_e \cdot I_z + K_{mp} \cdot f_e + K_{xx} \cdot f_e}{3 \cdot C_e \cdot f_e} = \frac{C_{e2} \cdot I_z + K_{mp} + K_{xx}}{3 \cdot C_e} = K_{CE} \cdot I_z + I_{xx}. \quad (11)$$

Потребляемая двигателем электрическая мощность определяется по уравнению

$$P_{эл} = 3 \cdot U_\phi \cdot I_\phi = 3 \cdot I_\phi \cdot (C_e \cdot f_e + R_\phi \cdot I_\phi + K_{\phi 1} \cdot I_\phi^2 + K_{\phi 2}), \quad (12)$$

а КПД БУД находим в соответствии с выражением

$$\eta_{БУД} = \frac{P_{эл}}{P_{ун}} = \frac{3 \cdot U_\phi \cdot I_\phi}{U_{ун} \cdot I_{ун}}$$

Изменяя значения нагрузочного резистора стенда, можно получить необходимое значение тока генератора I_z , которое определяет мощность нагрузки на валу по уравнению (10). По известному значению I_z вычисляются фазный ток I_ϕ двигателя (11) и потребляемая двигателем электрическая мощность по уравнению (12). Результаты расчета КПД БУД по предложенной методике приведены на рис. 6.

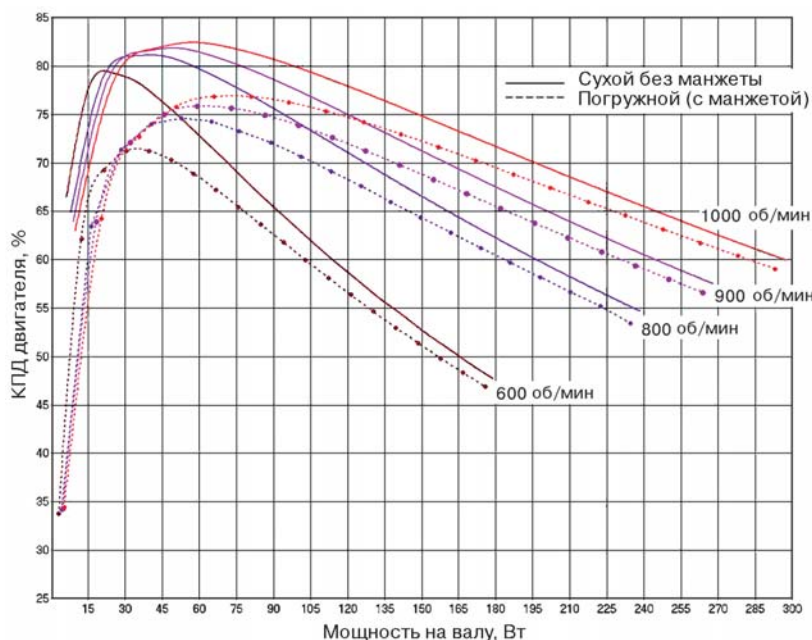


Рис. 4. Зависимость КПД погружного варианта электродвигателя ДБМ 70-1.1-1.3-3 от мощности на валу

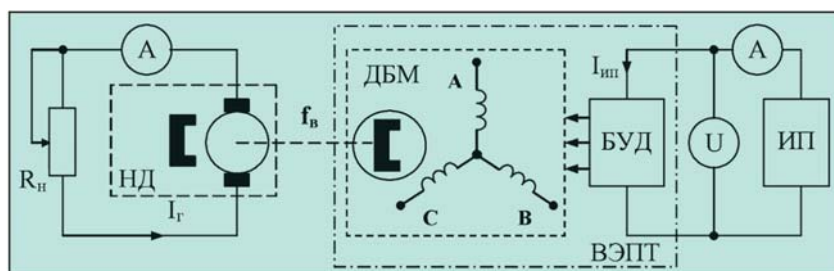


Рис. 5. Функциональная схема нагрузочного стенда

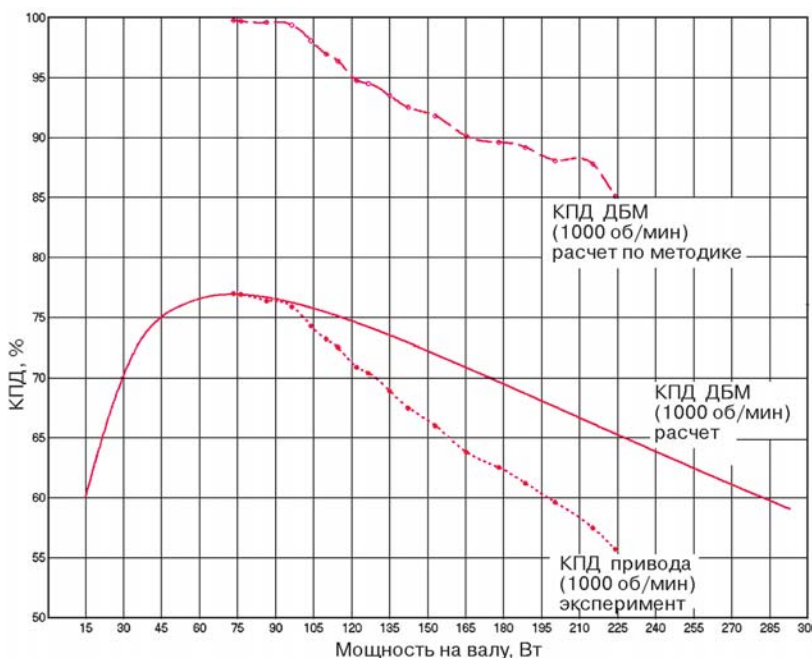


Рис. 6. Зависимость КПД БУД погружного варианта электродвигателя ДБМ 70-1.1-1.3-3 от мощности на валу

ВЫВОДЫ

- Разработанная методика исследования бесколлекторного электропривода в генераторном режиме позволяет получить экспериментальные данные, необходимые для математического описания электропривода в режиме двигателя. Такой подход исключает необходимость изготовления дорогостоящего специализированного блока управления.

- Полученные аналитические зависимости описывают работу бесколлекторного электродвигателя во всем диапазоне регулирования частоты вращения и при нагрузках на валу от минимальных до перегрузочных значений.

- Выполненные по этим зависимостям расчеты, подтвержденные экспериментом, показали, что двигатели типа ДБМ 70-1.1-1.3-3 сохраняют КПД до 70% при двойной перегрузке на валу. Это почти втрое превышает показатели ранее использовавшихся в АНПА коллекторных двигателей постоянного тока типа ДПУ 87-75. Анализ влияния мер герметизации показал, что КПД погружного варианта электродвигателя на номинальных оборотах в диапазоне от номинальной мощности до мощности двойной перегрузки уменьшился на 3-5%.

- Разработанная в статье методика уточнения КПД схемы управления бесколлекторным электродвигателем дала возможность оптимизировать схемотехнические решения, принятые при ее разработке. Установлено, что БУД разработки ИПМТ ДВО РАН в номинальном режиме работы двигателя имеют КПД 96%, а в режиме двойной перегрузки – около 87%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Беленький Ю.М. и др. Опыт разработки и применения бесконтактных моментных приводов. Л.: ЛДНТП, 1987.
2. Овчинников И.Е. Теория вентильных электрических двигателей. Л.: Наука, 1985.