

Наживин А.Е.¹, Осипов О.И.²¹ Инжиниринговый центр «Русэлпром»² Национальный исследовательский университет «МЭИ»

РАСЧЕТ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ КОМПЕНСАЦИИ ПОТЕРЬ СТЕНДА ИСПЫТАНИЙ ХВОСТОВОГО ВАЛА ВЕРТОЛЁТА

Статья посвящена обоснованию методики расчёта мощности асинхронного электродвигателя компенсации потерь электрозамкнутого стенда испытаний хвостового вала вертолёт. Статья содержит экспериментальные осциллограммы мгновенных мощностей на ключевых участках испытательного стенда, их сравнение с энергетической диаграммой электропривода стенда. По настоящей методике расчёта был спроектирован и внедрен в состав стенда испытания хвостового вала вертолета Ми-26 на предприятии АО «МВЗ им. М.Л. Мила» асинхронный частотно-регулируемый электропривод.

Ключевые слова: электропривод компенсации потерь, стенд испытаний хвостового вала вертолёт, обоснование мощности электродвигателя.

ВВЕДЕНИЕ

Для стендовых испытаний силовых трансмиссий вертолетов используются специальные электромеханические комплексы с установками нагружения испытуемых главных, промежуточных, согласующих и хвостовых их редукторов и валов [1]. В последние годы проводится как создание новых испытательных стендов [2], так и модернизация старых [3, 4]. Несмотря на это, в существующих работах по модернизациям электрозамкнутых стендов с приводом компенсации потерь отсутствует методика расчёта и обоснование мощности последнего. Решению данной проблемы и посвящается настоящая статья, подкрепленная экспериментальными исследованиями.

СОСТАВ СТЕНДА

На рис. 1 представлена функциональная схема силовой части модернизированного электропривода стенда. В качестве привода для компенсации энергетических потерь был выбран асинхронный частотно-регулируемый электропривод на основе преобразователя частоты серии VACON NXC и асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором производства концерна Русэлпром. Стенд имеет автономную питающую сеть напряжением 6 кВ для питания всех электрических машин стенда. Питание непосредственно электропривода стенда осуществляется от комплекта распределительного устройства КРУ через силовой трансформатор ТР1 типа ТМЗ-1000/10-65 (6/0,4 кВ, 1000 кВА, 1000 А) и автоматический выключатель QF1 типа ВА 55-43 (690 В, 1000 А).

Приводной асинхронный электродвигатель ПД с короткозамкнутым ротором типа АРМЧР-400/0,4-2УХЛ4 ($P_n = 400$ кВт, $U_n = 400$ В, $I_n = 680$ А, $n_n = 2980$ об/мин) установлен на одном валу с асинхронным электродвигателем с фазным ротором АД типа ФАЗМ 4000/6000 ($P_n = 4000$ кВт, $U_n = 6000$ В, $I_n = 448$ А, $n_n = 2980$ об/мин), который через испытуемый вал ИВ, промежуточный ПР и хвостовой редукторы ХР соединён с синхронным генератором СГ типа СДНЗ 219-49-10У4 ($P_n = 4000$ кВт, $U_n = 6000$ В, $I_n = 442$ А, $n_n = 600$ об/мин). Статоры АД и СГ соединены между

собой через высоковольтный автоматический выключатель Q. Приводной двигатель ПД разгоняется в режиме частотного пуска с помощью преобразователя частоты ПЧ типа NXC07305G2 с блоком торможения по звену постоянного тока и выходным фильтром du/dt ($P_n = 400$ кВт, $U_n = 400$ В, $I_n = 730$ А) до частоты вращения 2684 ± 50 об/мин. Встроенная функция ПЧ компенсации скольжения двигателя позволяет поддерживать частоту вращения вала двигателя постоянной вне зависимости от нагрузки. Алгоритм работы регулятора скорости компенсирует скольжение, отслеживая нагрузку на валу (ток статора) и увеличивая или уменьшая выходную частоту инвертора [5]. Тиристорный возбудитель ТВ1 типа SinamicsDCM ($U_{н.вых} = 115$ В, $I_{н.вых} = 315$ А), подключенный через понижающий трансформатор Тр3 типа ТСЗП-63/0,7-В (схема и группа соединения обмоток У/Д-11, $S_n = 73,9$ кВт, $U_{нв} = 400$ В, $I_{нв} = 112$ А, $U_{нн} = 113$ В, $I_{нн} = 320$ А) к сети 400 В, обеспечивает автоматическое регулирование по отклонению тока обмотки возбуждения МС, работающего в режиме генератора с помощью отрицательной обратной связи по току возбуждения I_b [5]. Ток возбуждения I_b меняет выходное напряжение статора СГ и соответственно входное напряжение статора АД. Асинхронный машинно-вентильный каскад в составе понижающего трансформатора Тр2 типа ТМ-320/6 (схема и группа соединения обмоток У/У-0, $S_n = 320$ кВт, $U_{нв} = 6000$ В, $U_{нн} = 400$ В), машинных преобразователей ПАГ1 и ПАГ2 типа ПСМ-1000-4 ($U_n = 60$ В, $I_n = 1000$ А), цепи переменного тока которых защищаются силовыми автоматическими выключателями QF2 и QF3, а также выпрямителя В по мостовой схеме и асинхронного двигателя с фазным ротором АД обеспечивает формирование крутящего момента согласно программе испытаний. Регулирование тока возбуждения обмоток возбуждения ОБ1 и ОБ2 ПАГ1 и ПАГ2 соответственно обеспечивается тиристорным возбудителем ТВ2 типа SinamicsDCM ($U_{н.вых} = 420$ В, $I_{н.вых} = 30$ А) в режиме автоматического регулирования момента с двухконтурным подчинённым регулированием координат: внешним контуром момента (обратная связь с датчика момента ДМ типа Т40В) и внутренним контуром тока. ТВ2 получает питание от понижающего трансформатора Тр4, который необходим для уменьшения угла управления преобразователя и соответственно пульсаций его выходного напряжения.

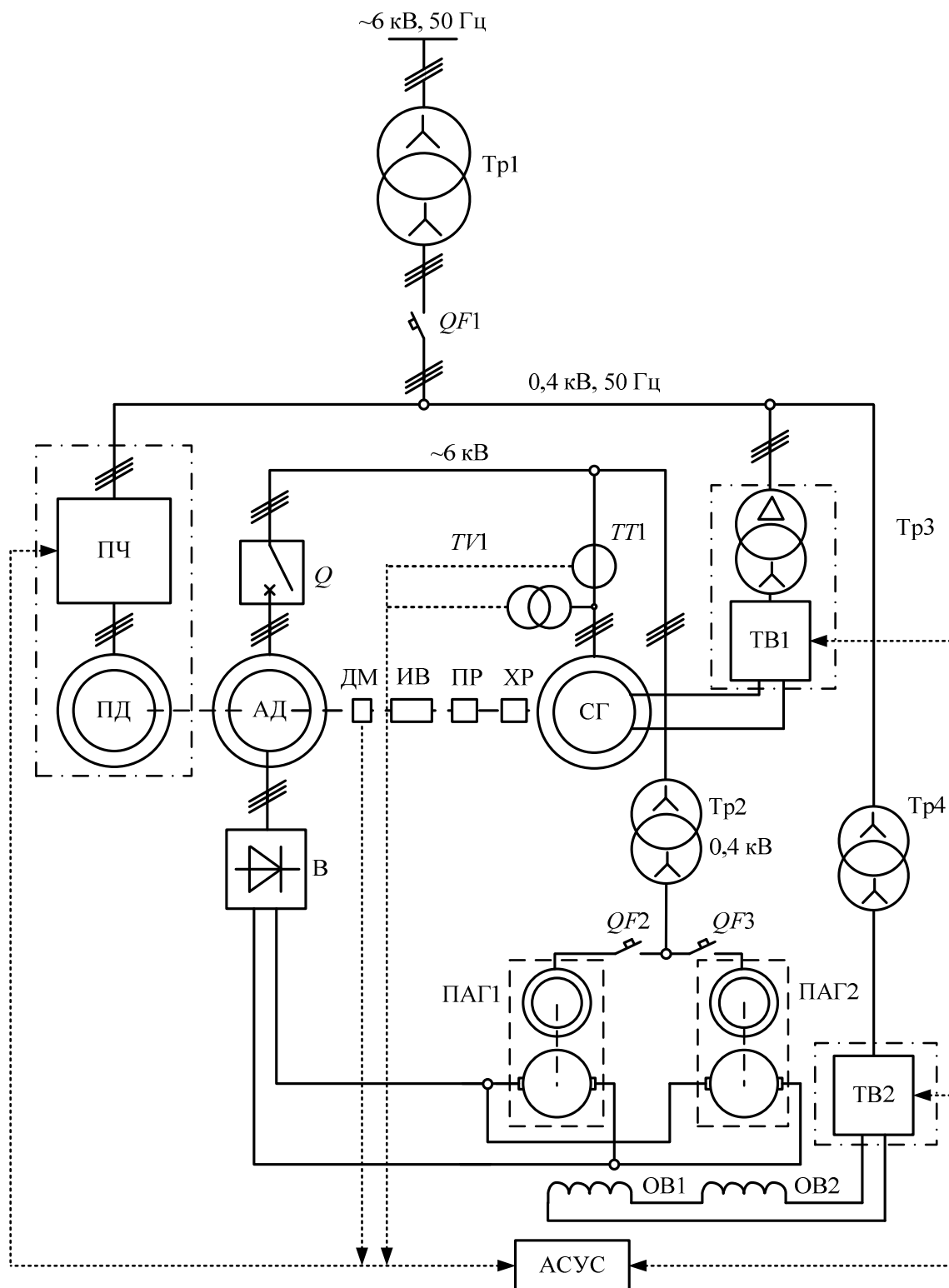


Рис. 1. Функциональная схема силовой части электропривода стенда

Управляющие и сигнальные импульсы формируются автоматизированной системой управления стендом АСУС на базе контроллера серии S7-1200 CPU1214C фирмы «SIEMENS» с сигнальными модулями и базовой панелью человеко-машинного интерфейса SIMATIC HMI типа KTP1200 Basic.

МЕТОДИКА ОБОСНОВАНИЯ МОЩНОСТИ ПРИВОДНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Расчет системы электропривода и определение параметров ее основных элементов выполнены для уско-

ренных испытаний хвостового вала. В соответствии с функциональной схемой силовой части электропривода стенда (рис. 1) приводной электродвигатель ПД выполняет функцию собственно приводного двигателя, обеспечивающего вращение испытуемого вала, а также компенсацию потерь в элементах замкнутого контура нагружения.

Любое преобразование энергии связано с потерей некоторой ее части. Энергетический поток в электроприводе можно показать в виде энергетической диаграммы, представленной на рис. 2. На энергетической

диаграмме **рис. 2** обозначены потери мощности: $\Delta P_{\text{тр}}$ – в трансформаторе, $\Delta P_{\text{пч}}$ – в преобразователе частоты, $\Delta P_{\text{пд}}$ – в приводном двигателе, $\Delta P_{\text{ад}}$ – в асинхронном двигателе, $\Delta P_{\text{пр}}$ – в промежуточном редукторе, $\Delta P_{\text{уг}}$ – в угловом редукторе, $\Delta P_{\text{сг}}$ – в синхронном генераторе, $\Delta P_{\text{тп}}$ – в токопроводах замкнутого контура.

Непосредственно мощности указаны на энергетической диаграмме как:

$P_{\text{с}}$ – электрическая мощность, потребляемая системой привода из питающей сети;

$P_{\text{тр}}$ – электрическая мощность, потребляемая трансформатором Тр;

$P_{\text{пч}}$ – электрическая мощность, потребляемая преобразователем частоты ПЧ;

$P_{\text{пд}}$ – электрическая мощность, потребляемая приводным электродвигателем ПД;

P_{Σ} – суммарная мощность, потребляемая высоковольтным асинхронным двигателем АД;

$P_{\text{м.пд}}$ – механическая мощность на валу приводного электродвигателя ПД;

$P_{\text{м.ад}}$ – механическая мощность, передаваемая высоковольтным асинхронным двигателем АД испытываемому хвостовому валу;

$P_{\text{сг}}$ – механическая мощность, потребляемая синхронным генератором СГ;

$P_{\text{в}}$ – электрическая мощность, возвращаемая асинхронному электродвигателю АД от нагрузочного синхронного генератора СГ.

Суммарная мощность, подводимая к АД:

$$P_{\Sigma} = P_{\text{м.пд}} + P_{\text{в}}.$$

Механическая мощность приводного электродвигателя в установившемся режиме работы должна быть больше или равна сумме всех потерь в замкнутом энергетическом контуре, поэтому выражение для расчета её величины будет иметь вид

$$P_{\text{м.пд}} = \Delta P_{\text{ад}} + \Delta P_{\text{пр}} + \Delta P_{\text{уг}} + \Delta P_{\text{сг}} + \Delta P_{\text{тп}}. \quad (1)$$

Согласно программе ускоренных испытаний хвостового вала момент загрузки на хвостовом валу на 3-м

этапе испытаний должен составлять $M_{\text{зв}} = 11000 \text{ Н} \cdot \text{м}$, а номинальная частота вращения вала $\omega_{\text{н}} = 281 \text{ рад/с}$. Согласно **рис. 1** крутящий момент на валу АД равен крутящему моменту ИВ, следовательно

$$P_{\text{м.ад}} = M_{\text{зв}} \cdot \omega_{\text{н}} = 11000 \cdot 281 = 3091 \text{ кВт},$$

Все коэффициенты полезного действия механизмов и устройств, используемые в расчётах, принимаются равными их номинальным значениям. Потери мощности в промежуточном редукторе определены как

$$\Delta P_{\text{пр}} = P_{\text{м.ад}} \frac{(1 - \eta_{\text{пр}})}{\eta_{\text{пр}}} = 31 \text{ кВт},$$

где $\eta_{\text{пр}} = 0,99$ – коэффициент полезного действия КПД промежуточного редуктора.

Потери мощности в угловом редукторе

$$\Delta P_{\text{уг}} = (P_{\text{м.ад}} - \Delta P_{\text{пр}}) \frac{(1 - \eta_{\text{уг}})}{\eta_{\text{уг}}} = 47 \text{ кВт},$$

где $\eta_{\text{уг}} = 0,985$ – КПД углового редуктора.

Потери мощности в синхронном генераторе

$$\Delta P_{\text{сг}} = (P_{\text{уг}} - \Delta P_{\text{уг}}) \frac{(1 - \eta_{\text{сг}})}{\eta_{\text{сг}}} = 106 \text{ кВт},$$

где $\eta_{\text{сг}} = 0,966$ – КПД синхронного генератора.

Электрическая мощность, возвращаемая асинхронному электродвигателю АД от нагрузочного синхронного генератора СГ за вычетом потерь в токопроводе $\Delta P_{\text{тп}}$:

$$P_{\text{в}} = P_{\text{м.ад}} - \Delta P_{\text{пр}} - \Delta P_{\text{уг}} - \Delta P_{\text{сг}} = 2907 \text{ кВт}.$$

Мощность, потребляемая из сети:

$$P_{\text{в}} = \sqrt{3} \cdot I_{\text{л}} \cdot U_{\text{л}} \cdot \cos \phi,$$

где $I_{\text{л}}, U_{\text{л}}$ – линейные ток и напряжение высоковольтной сети соответственно, $\cos \phi = 0,8$ – коэффициент мощности при 75% нагрузки [6].

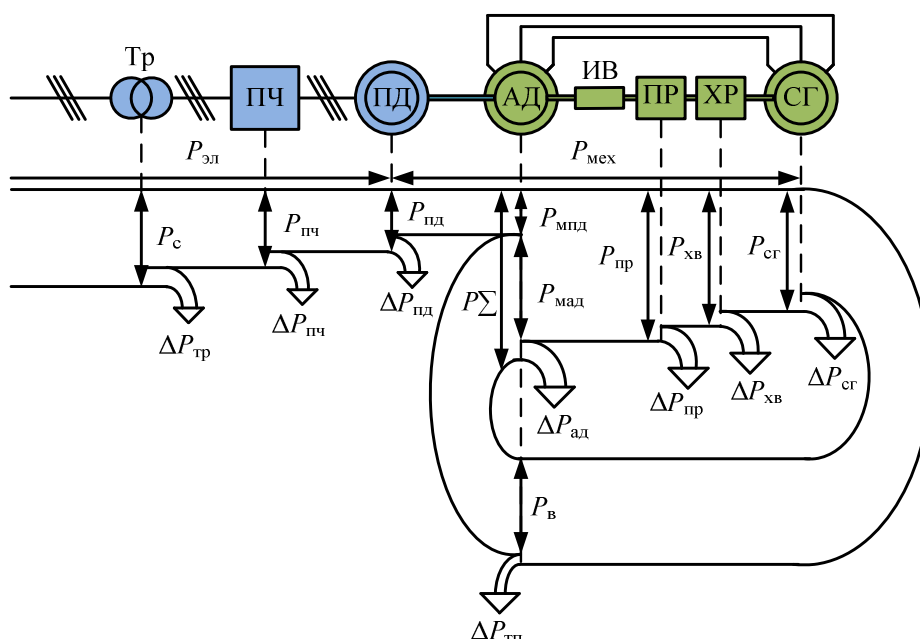


Рис. 2. Энергетическая диаграмма привода испытательного стенда

$$I_{\text{л}} = \frac{P_{\text{в}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{л}} \cdot \cos \varphi} = 350 \text{ А.}$$

При омическом сопротивлении силового токопровода замкнутого контура

$$R_{\text{тп}} = \rho \frac{l}{s} = 0,017 \frac{50}{95} = 0,009 \text{ Ом,}$$

где $\rho = 0,017$ – удельное сопротивление меди; $l = 50$ – длина токопровода, м; $s = 95$ – площадь поперечного сечения проводника, мм².

Потери мощности в токопроводе

$$\Delta P_{\text{тп}} = I_{\text{л}}^2 \cdot R_{\text{тп}} = 353^2 \cdot 0,009 = 1 \text{ кВт.}$$

Потери мощности в асинхронном двигателе

$$\Delta P_{\text{ад}} = P_{\text{в}} \frac{(1 - \eta_{\text{ад}})}{\eta_{\text{ад}}} = 137 \text{ кВт,}$$

где $\eta_{\text{ад}} = 0,955$ – КПД асинхронного двигателя.

Необходимая мощность на валу приводного двигателя по (1)

$$P_{\text{м.пд}} = 137 + 31 + 47 + 106 + 1 = 322 \text{ кВт.}$$

Электрическая мощность, потребляемая приводным электродвигателем, составит

$$P_{\text{э.пд}} = \frac{P_{\text{м.пд}}}{\eta_{\text{пд}}} = \frac{322}{0,955} = 337 \text{ кВт,}$$

где $\eta_{\text{пд}} = 0,955$ – КПД приводного электродвигателя.

В процессе пуска мощность приводного двигателя ПД включает в себя составляющие: мощность создания динамического момента $P_{\text{д}}$, мощность преодоления момента сопротивления генератора $P_{\text{сг}}$ и мощность механических потерь в агрегатах привода стенда. Для частотного пуска ПАГ1 и ПАГ2 стенд запускается с током возбуждения СГ, равным $I_{\text{в}} = 60$ А. От взаимодействия тока статора с магнитным потоком ротора появляется тормозной момент $M_{\text{сг}}$. Потери скольжения при частотном пуске с максимальной развиваемой мощности в конце разгона стремятся к нулю. Максимальная требуемая мощность двигателя определяется соотношением

$$P_{\text{тр.р}} = P_{\text{д}} + P_{\text{сг}} + P_{\text{мех}},$$

$$P_{\text{тр.р}} = (M_{\text{дин}} + M'_{\text{сг}} + \sum_{i=1}^{i=k} M_{\text{мех}i}) \omega_{\text{н}},$$

где $P_{\text{тр.р}}$ – требуемая электрическая мощность, потребляемая ПД при разгоне трансмиссии до номинальной частоты вращения $\omega_{\text{н}} = 281$ рад/с, $M_{\text{дин}}$ – динамический момент сопротивления, $M'_{\text{сг}}$ – статический момент сопротивления СГ приведенный к валу ПД, $\eta_{\text{пд}}$ – КПД двигателя ПД.

Суммарный момент инерции привода испытательного стенда

$$J_{\Sigma}' = J_{\text{пд}} + J_{\text{ад}} + J_{\Sigma\text{тр}} + \frac{J_{\text{сг}}}{i^2},$$

где J_{Σ}' – суммарный момент инерции привода испытательного стенда, приведенный к валу ПД; $J_{\text{пд}}$ – момент

инерции ПД; $J_{\text{ад}}$ – момент инерции АД; $J_{\Sigma\text{тр}}$ – суммарный момент инерции трансмиссии; $J_{\text{сг}}$ – момент инерции СГ; i – передаточное отношение углового редуктора.

$$J_{\Sigma}' = 5,5 + 235 + 10 + \frac{278}{25} = 261,6 \text{ кг·м}^2,$$

$$P_{\text{д}} = \frac{J_{\Sigma}' \cdot \omega_{\text{н}}^2}{t_{\text{р}}} = \frac{261,6 \cdot 281^2}{90} = 230 \text{ кВт,}$$

где $t_{\text{р}} = 90$ с – время разгона системы привода до номинальной частоты вращения.

Синхронный генератор СГ работает в режиме динамического торможения. Зависимость ЭДС обмотки статора от тока возбуждения синхронной машины при малых токах нагрузки и пренебрежении реакции якоря может быть аппроксимирована прямой, проходящей через начало осей координат и номинальную точку ($U_{\text{лн}} = 6000$ В, $I_{\text{вн}} = 268$ А) [7].

Поэтому напряжение статора СГ $U_{\text{л.п}}$ принимается пропорциональным току возбуждения $I_{\text{в}}$

$$U_{\text{л.п}} = \frac{U_{\text{лн}} \cdot I_{\text{в}}}{I_{\text{вн}}} = \frac{6000 \cdot 60}{268} = 1343 \text{ В,}$$

где $U_{\text{лн}} = 6000$ В – номинальное напряжение статора СГ; $I_{\text{вн}} = 268$ А – номинальный ток возбуждения СГ; $I_{\text{в}} = 60$ А – ток возбуждения СГ в процессе пуска.

Номинальное сопротивление статора СГ

$$Z_{\text{с.н}} = \frac{U_{\text{ф.н}}}{I_{\text{ф.н}}} = \frac{6000}{\sqrt{3} \cdot 442} = 7,8 \text{ Ом,}$$

где $I_{\text{ф.н}} = 442$ А – номинальный ток статора СГ.

Тогда ток статора СГ при пуске

$$I_{\text{ф.п}} = \frac{U_{\text{ф.п}}}{Z_{\text{с.н}}} = \frac{1343}{\sqrt{3} \cdot 7,8} = 99,4 \text{ А.}$$

Мощность СГ при пуске в конце разгона

$$P_{\text{сг.п}} = \sqrt{3} \cdot I_{\text{л.п}} \cdot U_{\text{л.п}} \cdot \cos \varphi_{\text{п}} = 46 \text{ кВт,}$$

где $\cos \varphi_{\text{п}} = 0,2$ – коэффициент мощности СГ при пуске [6].

Зависимость момента трения $M_{\text{тр}}$ от момента нагрузки $M_{\text{н}}$ имеет линейный характер [9]. Причиной линейной зависимости момента трения от передаваемого момента является то, что сила трения пропорциональна силе нормального давления, которая увеличивается с увеличением передаваемого момента.

$$M_{\text{тр}} = M_{\text{тр0}} + k \cdot M_{\text{н}},$$

где $M_{\text{тр0}} \approx 0,3 \cdot M_{\text{тр.н}}$ [8] – постоянный момент трения механизма.

Постоянный момент трения промежуточного редуктора на номинальной частоте $\omega_{\text{н}}$

$$M_{\text{тр.пр0}} = \frac{\Delta P_{\text{пр}}}{\omega_{\text{н}}} 0,3 = \frac{31000}{281} 0,3 = 33 \text{ Н·м.}$$

Постоянный момент трения углового редуктора на номинальной частоте $\omega_{\text{н}}$

$$M_{\text{тр.уг0}} = \frac{\Delta P_{\text{уг}}}{\omega_{\text{н}}} 0,3 = \frac{46000}{281} 0,3 = 49 \text{ Н·м.}$$

Механические потери в электрических машинах состоят из вентиляционных потерь и потерь на трение. Процент механических потерь от полных потерь в мощных электрических машинах переменного тока составляет 15% [9]. Изменением механических потерь от нагрузки можно пренебречь.

Момент сопротивления механических потерь АД

$$M_{\text{м.ад}} = \frac{\Delta P_{\text{ад}}}{\omega_n} 0,15 = \frac{133500}{281} 0,15 = 71 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Момент сопротивления механических потерь СГ, приведенный к валу ПД:

$$M'_{\text{м.сг}} = \frac{\Delta P_{\text{сг}}}{\omega_n} 0,15 = \frac{103000}{281} 0,15 = 55 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Мощность механических потерь системы привода в конце разгона

$$P_{\text{мех}} = \sum_{i=1}^{i=4} M_{\text{мех}i} \cdot \omega_n = 58,5 \text{ кВт}.$$

Максимальная требуемая мощность ПД в процессе разгона составит

$$P_{\text{тр.р}} = 230 + 46 + 58 = 334 \text{ кВт}.$$

С учётом $\eta_{\text{пд}}$ максимальная электрическая мощность, потребляемая приводным электродвигателем в процессе разгона, составит

$$P_{\text{эр.пд}} = \frac{P_{\text{тр.р}}}{\eta_{\text{пд}}} = \frac{334}{0,955} = 350 \text{ кВт}. \quad (2)$$

ИСПЫТАНИЯ И МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для проверки результатов методики расчёта мощности ПД были проведены экспериментальные исследования, которые выполнены на базе АСУС. В состав сети PROFIBUS-DPACYS входят: программируемый логический контроллер *SimaticS7-1200 CPU1214C* (ведущее устройство, мастер сети) с модулями ввода/вывода, модуль децентрализованной периферии *ET 200SP* с модулем аналогового ввода *AI EnergyMeter 480VACST* (электрический счётчик), а также ПЧ, ТВ1 и ТВ2. Универсальная макропрограмма, установленная в ПЧ, позволяет мастеру сети считывать фактическое значение выходной мощности ПЧ $P_{\text{э.пд}}$ на энергетической диаграмме (см. **рис. 2**). Выходные сигналы крутящего момента и частоты вращения с датчика *T40B* обрабатываются многоканальной измерительной системой *MGCplus* и далее в виде потенциальных сигналов $\pm 10 \text{ В}$ поступают на модуль аналогового ввода контроллера. В рабочей программе контроллера данные сигналы масштабируются, перемножаются и результат записывается в переменную, содержащую значение текущей механической мощности на валу АД $P_{\text{м.ад}}$ на энергетической диаграмме (см. **рис. 2**). В стартовой цепи СГ установлены трансформаторы тока и напряжения *TT1 600/5 А* и *TV1 6000/100 В* соответственно (см. **рис. 1**), преобразующие линейные токи и напряжения СГ в стандартные измерительные сигналы 5 А и 100 В, которые поступают в *EnergyMeter*. *EnergyMeter* позволяет контролировать различные электрические и энергетические параметры сети. *EnergyMeter* определяет значение активной мощности трехфазной сети $P_{\text{в}}$ за вычетом $\Delta P_{\text{пп}}$.

Таким образом, спроектированная система автоматического управления и мониторинга позволяет контролировать реальные мощности в характерных узлах системы привода станда.

Архивация электрических параметров не предусмотрена в АСУС, поэтому было принято решение записать осциллограммы вышеперечисленных мощностей с помощью встроенного цифрового осциллографа программного обеспечения *STARTER* для ввода в эксплуатацию приводов, установленного на ноутбуке. Ноутбук был подключен к сети *PROFIBUS-DP* через *USB 2.0* посредством коммуникационного процессора *CP5711*. Для обмена данными между контроллером и ТВ1 была выбрана свободная телеграмма *PZD 8/8*, т.е. в формате 8 слов принимается, 8 слов передается. Переменные типа «int» (от -32768 до 32767), содержащие фактические значения мощностей, записывались в одномерный массив слов «array[0...7] of word» и передавались по шине данных в ТВ1. Полученные от контроллера телеграммы *PROFIdrive PZD 8/8* (заданные значения) в формате *word* доступны для наблюдения и осциллографирования на коннекторном выходе *r2050[0...31]* тиристорного возбуждателя ТВ1.

В ходе плановых испытаний вертолётных валов на модернизированном электроприводе станда были сняты осциллограммы мощности $P_{\text{э.пд}}$ (**рис. 3**), потребляемой ПД в процессе пуска. Как видно из представленной осциллограммы, максимальная мощность в конце разгона составила $P_{\text{эр.пд}} = 367 \text{ кВт}$.

На **рис. 4** и **5** представлены: мощность на валу АД $P_{\text{м.ад}}$ (мощность загрузки валов трансмиссии), мощность на выходе СГ – $P_{\text{в}}$ и мощность $P_{\text{э.пд}}$, потребляемая ПД на 3-м этапе программы испытаний, при максимальной нагрузке валов в 11 кН.

Как видно из представленных осциллограмм, максимальное относительное расхождение между расчетными значениями и реальными величинами составляет 14%.

$$\Delta_m = \frac{337 - 295}{295} 100\% = 14\%.$$

Уровень точности расчёта находится в пределах точности исходных величин, которые находились в расположении (КПД, $\cos\phi$, $U_{\text{л.п}}$, $M_{\text{тр0}}$ и т.д.). По наибольшему значению рассчитанной мощности (2) выбирается двигатель ближайшей большей мощности из ряда значений номинальных мощностей электрических машин соответственно с ГОСТ 12139-84 [10]. В соответствии с данным расчётом мощность электродвигателя компенсации потерь станда была выбрана равной 400 кВт.

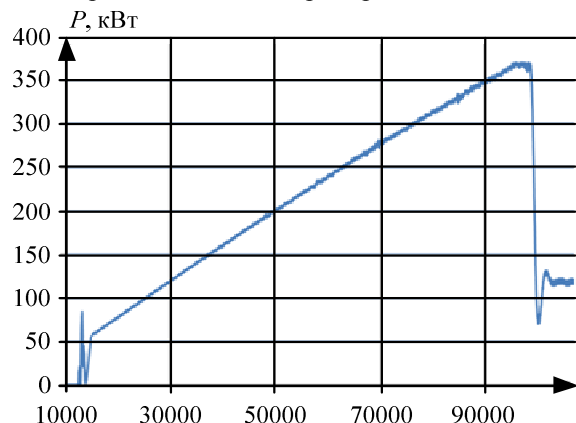


Рис. 3. Мощность $P_{\text{эр.пд}}$, потребляемая ПД в процессе пуска

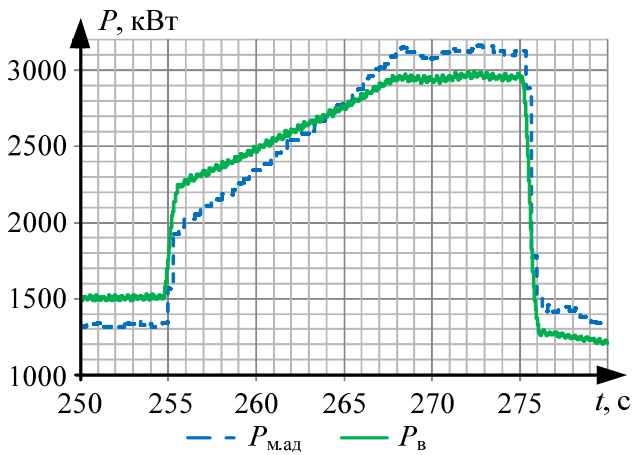


Рис. 4. Мощность $P_{м.ад}$ на валу АД и мощность P_v , возвращаемая СГ на 3-м этапе программы испытаний

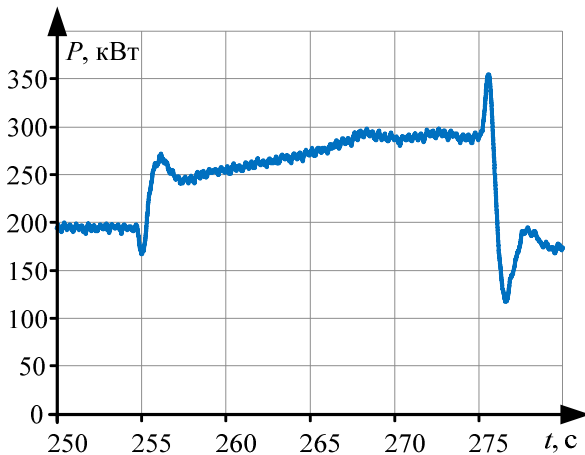


Рис. 5. Мощность $P_{э.пд}$, потребляемая ПД на 3-м этапе программы испытаний

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная методика учёта составляющих мощности электродвигателя компенсации потерь позволяет обосновать выбор мощности привода для электромеханических комплексов электрозамкнутого типа подобных объектов. Промышленная эксплуатация привода стенда испытания хвостового вала вертолёта МИ-26 на предприятии АО «МВЗ им. М.Л. Миля» подтвердила достоверность выбора мощности его электропривода. Экспериментальная оценка результатов расчёта на примере этого электропривода показала их достаточную сходимость (относительная разница не превышала 14%).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Электропривод стенда для испытаний силовой трансмиссии вертолетов / Осипов О.И., Холин А.В., Иванов Г.М., Новиков В.И. // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 3: в 5 ч. Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. Ч. 3. С. 107-112.
2. Aerospace Manufacturing and Design // RedViking and Siemens save energy, time and money for the United States Military. Интернет-журн. 31.08.2015. URL: <http://www.aerospacemanufacturinganddesign.com/article/amd0815-military-helicopter-powertrain-redviking/> (дата обращения: 25.09.2017).
3. Осипов О.И., Наживин А.Е. Электромеханический комплекс для испытания силовой трансмиссии вертолетов // XI Международная IEEE Сибирская конференция по управлению и связи SIBCON-2015, Омск, 11-13 мая 2015 г. Published in Control and Communications (SIBCON) 2015. pp. 12-15. doi 10.1109/SIBCON.2015/7147078.
4. Наживин А.Е., Осипов О.И. Модернизация электропривода стенда испытаний хвостового вала вертолёта // Международный инженерный журнал «Приводы и компоненты машин»; ООО НПП «Подъемтранс сервис». 2016. № 4-5. С. 16-19.
5. Терехов В.М., Осипов О.И. Системы управления электроприводов: учебник для студентов высших учебных заведений / под ред. В.М. Терехова. М.: Издательский центр «Академия», 2006. 304 с.
6. Natural Resources Canada [Электронный ресурс]: Electric Motors: EnergyEfficiencyReferenceGuide // CEATechnologies Inc. (CEATI) 2007. С. 100. URL: <http://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/energy/pdf/energystar/motors-ref-eng.pdf> (дата обращения: 25.09.2017)
7. Кафедра Электромеханики Института Электротехники МЭИ [Электронный ресурс]: Гл. 4. Синхронные машины 4-3.8. Характеристики и векторные диаграммы URL: <http://elmech.mpei.ac.ru/em/em/Ch4/4-03-08-6.htm> (дата обращения: 25.09.2017).
8. Ключев В.И. Теория электропривода: учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 2001. 704 с.
9. Rahul Tiwari, Dr. A.K. Bhardwaj. Analysis of Induction Motor with die cast rotor // INTERNATIONAL JOURNAL OF INNOVATIVE RESEARCH IN ELECTRICAL, ELECTRONICS, INSTRUMENTATION AND CONTROL ENGINEERING, vol. 2, iss. 6, June 2014, pp. 1552-1558. URL: <http://www.ijireeice.com/upload/2014/june/IJIREEICE1D%20s%20raahul%20Analysis%20of%20Induction.pdf> (дата обращения: 25.09.2017).
10. ГОСТ 12139-84 (СТ СЭВ 4434-83). Машины электрические вращающиеся. Ряды номинальных мощностей, напряжений и частот. М.: Изд-во стандартов, 1985. 5 с.

Поступила в редакцию 24 октября 2017 г.

INFORMATION IN ENGLISH

POWER CALCULATION OF THE ELECTRIC MOTOR OF LOSSES COMPENSATION OF TEST STAND OF HELICOPTER TAIL SHAFT

Andrey E. Nazhivin

First rank engineer, «Ruselprom» engineering center LLC, Moscow, Russia.

E-mail: nazhivinandrey@mail.ru

Oleg I. Osipov

D.Sc. (Eng.), Professor, Department of Automated Electric Drive, Moscow Power Engineering Institute, Moscow, Russia.

E-mail: osipovoi2015@yandex.ru

The paper is devoted to substantiation of the method of power calculation of the electric motor of losses compensation of test stand of helicopter tail shaft. The paper contains experimental oscillograms of instantaneous powers in characteristic places of the test stand, their comparison with the power diagram of the electric drive of the stand. According to this method of calculation the asynchronous variable-frequency electric drive for test stand of helicopter tail shaft was designed and implemented at the JSC «MVZ named after M.L. Mil».

Keywords: Electric drive of losses compensation, test stand of helicopter tail shaft, power calculation of the electric motor.

REFERENCES

1. Osipov O.I., Kholin A.V., Ivanov G.M., Novikov V.I. *Elektroprivod stenda dlya ispytaniy silovoy transmissii vertoletov*. [Electric drive of the test stand for testing power transmission of helicopters]. Tula, TulGU Publ., 2010, pp. 107-112. (In Russian)
2. Aerospace Manufacturing and Design. RedViking and Siemens save energy, time and money for the United States Military. Magazine 31.08.2015. URL: <http://www.aerospacemanufacturinganddesign.com/article/amd0815-military-helicopter-powertrain-redviking/> (Accessed: 25.09.2017).
3. Osipov O.I., Nazhivin A.E. Electromechanical Complex for Test of Power Transmission of Helicopters. *2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*, Omsk, 21-23 may 2015, pp. 12-15. doi 10.1109/SIBCON.2015/7147078.
4. Nazhivin A.E., Osipov O.I. Modernization of the electric drive of the test stand of helicopter tail shaft. *International Engineering Journal «Machine drives and parts»*. 2016, no. 4-5, pp. 16-19. (In Russian)
5. Terekhov V.M., Osipov O.I. *Sistemy upravleniya elektroprivodov: Uchebnik* [Control systems of electric drives: The textbook]. Moscow, Akademiya Publ., 2006, 704 p. (In Russian)
6. Natural Resources Canada [Electronic resource]: Electric Motors: Energy Efficiency Reference Guide. CEA Technologies Inc. (CEATI) 2007, 100 p. URL: <http://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/energy/pdf/energystar/motors-ref-eng.pdf> (Accessed: 25.09.2017)
7. Department of Electromechanics of Institute of Electrical Engineering of MPEI [Electronic resource]: Chapter 4. Synchronous machines 4-3.8. Characteristics and vector diagrams. URL: <http://elmech.mpei.ac.ru/em/em/Ch4/4-03-08-6.htm> (Accessed: 25.09.2017).
8. Klyuchev V.I. *Teoriya elektroprivoda: Uchebnik* [Theory of the electric drive: The textbook]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2001, 704 p. (In Russian)
9. Rahul Tiwari, Dr. A.K. Bhardwaj. Analysis of Induction Motor with die cast rotor. *INTERNATIONAL JOURNAL OF INNOVATIVE RESEARCH IN ELECTRICAL, ELECTRONICS, INSTRUMENTATION AND CONTROL ENGINEERING*, vol. 2, iss. 6, June 2014, pp. 1552-1558. URL: <http://www.ijireeice.com/upload/2014/june/IJIREEIC E1D%20s%20rahul%20Analysis%20of%20Induction.pdf> (Accessed: 25.09.2017).
10. State Standart 12139-84 (STSEV 4434-83). Rotating electric machines. Series of nominal powers, voltages and frequencies. Moscow, Standartuniform Publ., 1985. 5 p. (In Russian).

Наживин А.Е., Осипов О.И. Расчет мощности электродвигателя компенсации потерь стенда испытаний хвостового вала вертолёта // Электротехнические системы и комплексы. 2017. № 4(37). С. 20-26. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-4\(37\)-20-26](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-4(37)-20-26)

Nazhivin A.E., Osipov O.I. Power Calculation of the Electric Motor of Losses Compensation of Test Stand of Helicopter Tail Shaft. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2017, no. 4(37), pp. 20-26. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-4\(37\)-20-26](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2017-4(37)-20-26)