

ИССЛЕДОВАНИЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ, РАБОТАЮЩЕГО СОВМЕСТНО С ПЧ, С ПОМОЩЬЮ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

И.Ю. Седова, А.В. Куш

Исследованы предельные значения электромагнитных параметров серийных двигателей, работающих совместно с высокочастотными НПЧ. Установлено, что предельная мощность $P_{\text{пред}}$ в среднем в n раз превышает номинальную мощность двигателя, где n равно отношению частоты преобразователя к номинальной. Выявлены зависимости предельных параметров машины при питании двигателя от НПЧ 100 Гц, для двигателей с синхронной скоростью 1500 и 3000 об/мин. Результаты исследований представлены в виде графиков

Ключевые слова: асинхронный двигатель, преобразователь частоты, вентильный электропривод

Использование асинхронных двигателей (АД) общепромышленного исполнения в составе вентильного электропривода повышенной частоты предполагает изменение обмоточных данных машины и определяет необходимость выполнения поверочного расчета с целью исследования рабочих характеристик двигателя и выявления предельных возможностей его работы.*

Электропривод с преобразователем частоты (ПЧ) 100 Гц показан на рис. 1.

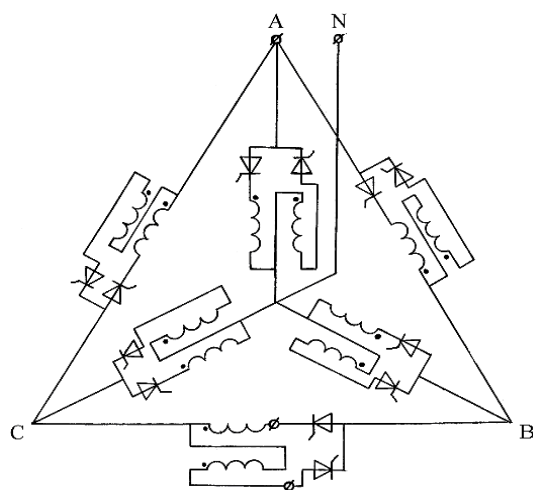


Рис. 1. Схема ПЧ на 100 Гц

Каждая фазная обмотка АД, работающего совместно с ПЧ подобного типа, состоит из четырех полуобмоток, подключаемых поочередно к фазному и линейному напряжению сети.

Алгоритм работы данного ПЧ может быть проиллюстрирован рис. 2, показывающим результирующее выходное напряжение преобразователя для соответствующих фаз. При этом угол управления всеми вентилями принят

равным 45° , что не исключает возможности введения в модель и других значений углов.

Поверочный расчет двигателя выполняется с допущением: расчет всех показателей при несинусоидальном фазном напряжении осуществляется для действующего значения этого напряжения, а его частота является частотой основной гармоники.

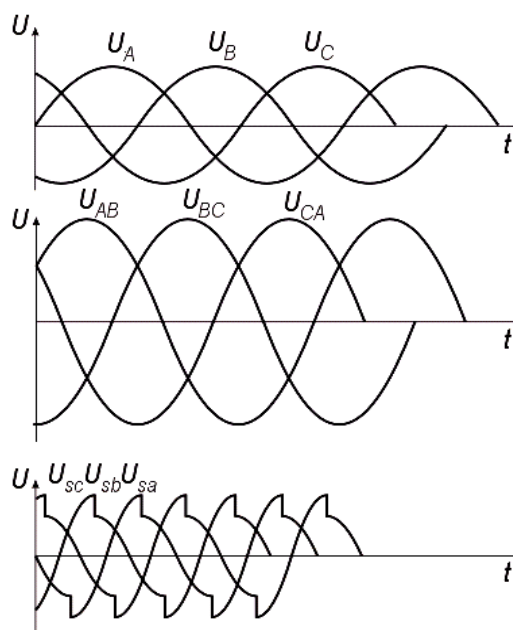


Рис. 2. Кривые результирующего напряжения на обмотках двигателя

При этом расчет состоит из следующих этапов:

1. Расчет числа витков обмотки статора, выбор обмоточного провода.

Число витков обмотки статора w_1 выбирается из условия постоянства напряжения на виток, обеспечивающего неизменность магнитного потока в воздушном зазоре машины при изменении действующего значения питающего напряжения. Реальный АД заменяется эквивалентным,

Седова Ирина Юрьевна - СевКавГТУ, канд. техн. наук, доцент, тел. (8652) 24-01-62

Куш Александр Викторович - филиал ОАО «СО ЕЭС» ОДУ Юга, канд. техн. наук, тел. (962) 440-35-12, E-mail: KuschAV@yug.so-ups.ru

имеющим в $U_{\delta} \cdot f_{\mu} / (U_n \cdot f_{\delta})$ больше числа витков на фазу по сравнению с базовым двигателем.

В случае если обмотка статора состоит из n обмоток, подключаемых попеременно к фазному и линейному напряжению сети, то общее число витков делится на n групп, причем число витков в группах, подключаемых к линейному напряжению, должно быть в $\sqrt{3}$ раз больше, чем в группах, подключаемых к фазному напряжению.

Сечение обмоточного провода выбирается с помощью процедуры сортировки стандартных проводов из условия, что $d_{cm} \geq d_{расч}$, при этом значение коэффициента заполнения паза должно находиться в стандартных пределах от 0,68 до 0,72.

2. Расчет параметров рабочего режима.

Определяются значения активных и индуктивных параметров схемы замещения машины в именованных единицах:

$$r_1 = \rho_v \cdot \frac{L_1}{q_{эф} \cdot a}$$

где r_1 – активное сопротивление фазы обмотки статора, Ом;

ρ_v – удельное сопротивление материала обмотки при расчетной температуре, Ом*м;

L_1 – общая длина эффективных проводников в пазу, м.

$$L_1 = l_{cp1} \cdot w_1$$

где l_{cp1} – средняя длина витка, м.

$$l_{cp1} = 2 \cdot (l_{n1} + l_{л1}); r_2 = r_2 + \frac{4 \cdot m(w_1 \cdot k_{об})^2}{Z_2}$$

где r_2 – активное сопротивление фазы обмотки ротора, Ом.

$$x_1 = 15,8 \cdot \frac{f_1}{100} \cdot \left(\frac{w_1}{100} \right)^2 \cdot \frac{l_{\delta}}{p \cdot q} \cdot (\lambda_{л1} + \lambda_{л2} + \lambda_{л1})$$

где x_1 – индуктивное сопротивление фазы обмотки статора, Ом;

$\lambda_{л1}, \lambda_{л2}, \lambda_{л1}$ – коэффициенты магнитной проводимости.

$$x_2 = 7,9 \cdot f_1 \cdot l_{\delta} \cdot (\lambda_{л2} + \lambda_{л2} + \lambda_{л2}) \cdot 10^{-6}$$

где x_2 – индуктивное сопротивление фазы обмотки ротора, Ом

Рассчитанные величины являются основой для определения параметров динамической модели АД с измененными обмоточными данными. Значения $r_{1ф(а)}$ и $x_{1ф(а)}$ соответствующих частей фазных обмоток вычисляются как:

$$R_{1ф} = r_1 \cdot w_{1ф} / w_1; x_{1ф} = x_1 \cdot w_{1ф} / w_1$$

В формулах r_2 и x_2 в качестве расчетных значений $w_{лн}$ и $l_{лн}$ принимаются параметры базового двигателя.

Параметры рабочего режима ротора могут быть также приняты из справочных данных или рассчитаны согласно алгоритму типизации.

3. Расчет намагничивающего тока.

Выполняется совместно с расчетом магнитной цепи машины:

$$1. \text{ Индукций (В): } B_a = \frac{\Phi}{2 \cdot h_a \cdot l_{cm1} \cdot k_c},$$

$$B_j = \frac{\Phi}{2 \cdot h_j \cdot l_{cm2} \cdot k_c}$$

где k_c – коэффициент заполнения стально магнитопровода.

2. Напряженностей поля (H) и магнитных напряжений (F) отдельных участков магнитной цепи: $F_a = L_a \cdot H_a; F_j = L_j \cdot H_j$

где L_a – длина средней магнитной линии ярма статора, м;

H_a – напряженность поля при индукции B_a , А/м;

L_j – длина средней магнитной линии потока в ярме ротора, м;

H_j – напряженность поля при индукции B_j , А/м.

$$k_{\mu} = \frac{F_u}{F_{\delta}}$$

где k_{μ} – коэффициент насыщения магнитной цепи;

F_u – магнитное напряжение на пару полюсов, А;

F_{δ} – магнитное напряжение воздушного зазора, А.

$$I_{\mu} = \frac{p \cdot F_u}{0,9 \cdot m \cdot w_1 \cdot k_{об}}; I_{\mu}^* = \frac{I_{\mu}}{I_{лн}}$$

где I_{μ} – намагничивающий ток, А;

I_{μ}^* – относительное значение намагничивающего тока;

$I_{лн}$ – номинальный ток обмотки статора, А.

Величина намагничивающего тока оценивается его относительными значениями, причем в качестве базового значения может приниматься номинальный ток используемого двигателя или расчетное значение тока для двигателя с измененными обмоточными данными.

4. Расчет потерь, рабочих и механических характеристик.

Осуществляется по стандартной проектной процедуре [1] с учетом измененных параметров режима и конструкции машины.

Проверочный расчет был реализован в виде программного комплекса [2] и в настоящей работе был использован для определения предельных значений электромагнитных параметров серийных двигателей, работающих совместно с ПЧ, а также имеющих измененные обмоточные данные, при номинальных для данной машины величины индукции в воздушном зазоре и линейной токовой нагрузки статора.

Как известно [1], расчетная мощность двигателя связана с ее основными геометрическими и режимными параметрами с помощью машинной постоянной Арнольда выражением:

$$C_A = \frac{D^2 \cdot l_{\delta} \cdot \Omega}{P'} = \frac{2}{\pi \cdot \alpha_{\delta} \cdot k_B \cdot k_{об} \cdot A \cdot B_{\delta}} \quad (1)$$

где D – внутренний диаметр статора, м;
 l_δ – расчетная длина воздушного зазора, м;
 Ω – частота вращения, об/мин;
 P' – расчетная мощность, Вт;
 A – линейная нагрузка, А/м;
 B_δ – индукция в воздушном зазоре, Тл;
 $\alpha_\delta, k_B, k_{об}$ – коэффициенты.

Из выражения (1) видно, что с ростом частоты питающего напряжения и, следовательно, частоты вращения ротора при постоянном значении интегральной электромагнитной нагрузки машины, которая определяется неизменностью произведения $A \cdot B_\delta$, возрастает величина расчетной мощности P' .

Поэтому при питании двигателя напряжением с частотой, превышающей номинальную, предельная мощность, соответствующая номинальным значениям A и B_δ , будет больше номинальной мощности АД в $k_{пр}$ раз, то есть $k_{пр} = P_{пр}/P_n$ и для ее уменьшения необходимо снижать A и B_δ .

Кроме того, двигатель, работающий на повышенной частоте при постоянных значениях A и B_δ , не требует проверки на нагрев [3], так как при такой эксплуатации условия охлаждения для самовентилируемых машин улучшаются. Однако, хотя серийные машины, как правило, имеют 2-5-кратный запас по механической прочности, необходима проверка вала ротора двигателя, используемого при повышенной частоте.

Для серийных двигателей с измененными обмоточными данными была исследована зависимость предельных параметров машины, работающей совместно с ПЧ 100 Гц $k_{пр}$, $M_{пр}/M_{ном}$, а также $I_\mu/I_{\mu ном}$ от номинальной мощности базового двигателя с помощью математической модели поверочного расчета. На рис.3-5 представлены графики зависимостей соответственно $k_{пр}$, $M_{пр}/M_{ном}$ и $I_\mu/I_{\mu ном}$ от $P_{ном}$ для ПЧ 100 Гц для различных величин синхронной скорости базовой машины.

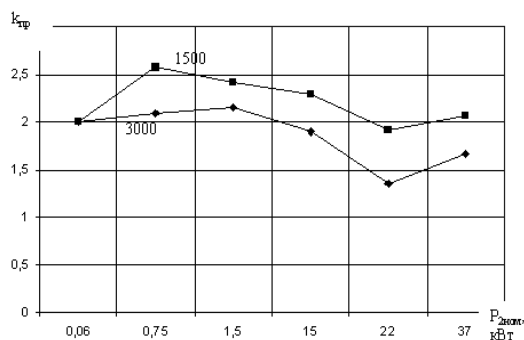


Рис. 3. Зависимость $k_{пр}$ от $P_{2ном}$

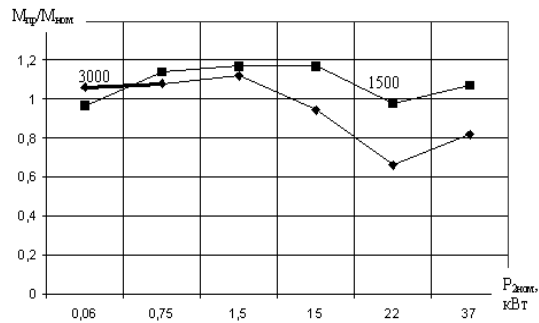


Рис. 4. Зависимость $M_{пр}/M_{ном}$ от $P_{2ном}$

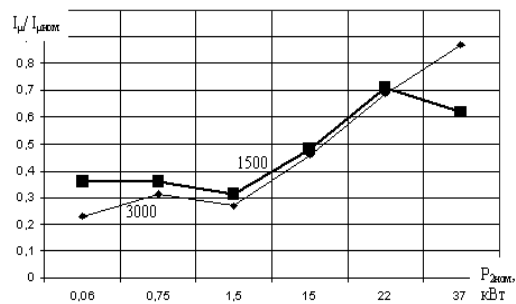


Рис. 5. Зависимость $I_\mu/I_{\mu ном}$ от $P_{2ном}$

Как следует из рис.3, предельные значения мощности при питании АД от преобразователя 100 Гц превышают номинальные в среднем в 2 раза, причем для синхронных частот $n_1=3000$ об/мин значения $k_{пр}$ ниже, чем при $n_1=1500$ об/мин, что объясняется большими потерями в сердечнике при больших скоростях перемагничивания. В силу того,

что $M_{пр} \approx \frac{P_{пр}}{\omega_0}$, соотношение предельного и

номинального моментов $M_{пр}/M_{ном}$ находится в диапазоне от 0,7 до 1,15, при этом по упомянутой выше причине для синхронной частоты $n_1=3000$ об/мин эти соотношения меньше, чем для $n_1=1500$ об/мин. На рис.6 приведена зависимость КПД АД, работающего совместно с ПЧ 100 Гц от номинальной мощности серийных двигателей. С ростом номинальной мощности возрастает относительное значение намагничивающего тока, и снижается КПД, как видно из рис.5 и рис.6. Кроме того, величины I_μ больше, а КПД меньше соответствующих значений базового двигателя той же мощности, что можно объяснить более тяжелыми в энергетическом отношении условиями работы АД, питающихся от преобразователей частоты.

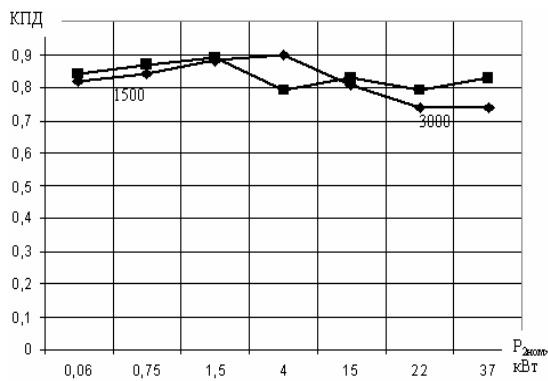


Рис. 6. Зависимость КПД АД, работающих совместно с ПЧ 100 Гц от номинальной мощности серийных двигателей

Литература

1. Копылов И.П., Горяинов Ф.А., Клюков Б.К. и др. Проектирование электрических машин: учеб. пособие для вузов / Под ред. И.П. Копылова. – М.: Энергия, 1980. – 496 с.
2. Седова И.Ю., Куш А.В. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2005613034 / Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ. М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам, 2005.
3. Ядыкин В.С., Лоскутов Е.Д., Ерина М.А. Влияние момента включения вентиляльных элементов на энергетические показатели преобразователей / Вестник СевКавГТУ. Серия «Естественнонаучная». – Ставрополь: СевКавГТУ, 2003. – № 1 (16) – С. 169-173.

Северо-Кавказский государственный технический университет
 Открытое акционерное общество «Системный оператор Единой энергетической системы»
 «Объединенное диспетчерское управление энергосистемами Юга»

ASYNCHRONOUS MOTOR WORKING SIMULTANEOUSLY WITH FREQUENCY OF CONVERTER MATHEMATICAL MODELING RESEARCH

I.Yu. Sedova, A.V. Kusch

Limiting values of electromagnetic characteristic of serial motors, working simultaneously with high-frequency frequency of converter are researched. Established, that limiting power P_{max} in n times exceed nominal power of motor at the average, where n is the ratio of converter frequency to nominal frequency. Relations of machine limiting parameters with motor feeding from frequency of converter 100 Hz, for the motors with synchronous speed 1500 and 3000 rpm are discovered. Research results are shown in the graphs form

Key words: asynchronous motor, frequency converter, valve electric drive