

УДК 621.658.562

В. А. Полетаев, И. В. Кулак

КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВОЗДУШНОГО ЗАЗОРА ВЗРЫВОЗАЩИЩЕННОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Точность выходных энергетических показателей двигателей определяется точностью находящихся с ними в зависимости функциональных параметров, среди которых наибольший долевой вклад имеет точность воздушного зазора (ВЗ) между ротором и статором [1].

Значения величин ВЗ γ и относительной неравномерности воздушного зазора (НВЗ) ε влияют неодинаково на энергетические показатели АД, что определяет дифференцированный подход к регламентации этих параметров [2]

$$\varepsilon_{max} = \frac{e_{max}}{e_{min}} 100\%, \quad (1)$$

где e_{max} – максимальная величина эксцентрикитета оси сердечника ротора относительно оси отверстия статора, мм.

Значения e_{min} и e_{max} определяют расчетом размерных цепей A и B , составляющие и замыкающие звенья которых указаны на рис. 1.

Помимо снижения энергетических характеристик АД, НВЗ значительно увеличивает одностороннее магнитное притяжение ротора, которое достигает 400-600 % от расчетных значений и приводит к сокращению срока службы подшипни-

ков качения, поломкам роторных валов, задеванию ротора о статор и отказу работы двигателя. Эксцентрикитет ротора является одной из главных причин возникновения магнитного шума при работе АД и перекоса осей вращения внутреннего и наружного колец подшипника. Увеличение перекоса осей вращения от 0,05 до 0,5° вызывает увеличение эквивалентной нагрузки в 2,6-2,9 и снижение 90 %-го ресурса в 16-25 раз.

Поэтому задача совершенствования качества ВАД за счет управления точностью ВЗ весьма актуальна.

Для управления точностью ВЗ необходимо исследовать процесс его формирования, результатом которого будет математическая модель ВЗ, отражающая влияние на него основных факторов.

Установлено, что основными причинами возникновения отклонения величины ВЗ от расчетного значения являются конструктивные, технологические и эксплуатационные факторы. Точность величины ВЗ определяется точностью расположения исполнительных поверхностей: внутренней поверхности пакета статора и наружной поверхности ротора.

В результате исследований получена математическая модель ВЗ, отражающая влияние конст-

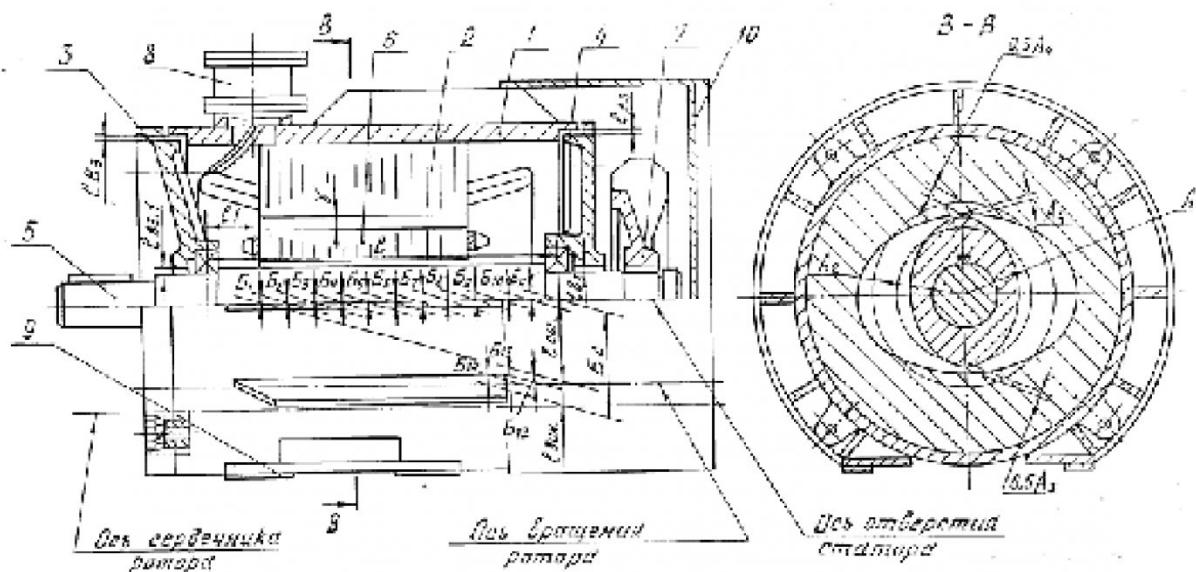


Рис. 1. Конструкция и схемы размерных цепей взрывозащищенного АД:

- 1 – станина; 2 – сердечник статора; 3, 4 – подшипниковые щиты; 5 – вал; 6 – сердечник ротора;
 7 – вентилятор; 8 – коробка выводов; 9 – лапы; 10 – кожух; γ – воздушный зазор;
 l_{B3}, l_{B31} – взрывозащитные зазоры; $A_1, \dots, A_4, A_\Delta$ – звенья размерной цепи величины γ ;
 $B_1, \dots, B_{14}, B_\Delta, e_{cm}, e_{dim}$ – звенья размерной цепи эксцентрикитета ротора

руктивных параметров в динамике:

$$\gamma_{\text{дин}} = \gamma - e_{cm} \cos \varphi - z_0 \times \times \cos \left[48EJ(\ell^3 mp\omega^2)^{-1} \varphi \right]^{1/2}, \quad (2)$$

где φ , z_0 – обобщенные координаты, соответственно, угла поворота ротора, град. и динамический эксцентриситет оси вращения ротора относительно статора, мм; E – модуль упругости 1 рода материала вала ротора, кг/мм²; J – момент инерции ротора, мм⁴; ℓ – расстояние между опорами ротора, мм; mp – масса ротора, кг; ω – частота вращения ротора, с⁻¹; e_{cm} – эксцентриситет оси вращения ротора относительно отверстия статора (статический эксцентриситет).

Разработанная модель не учитывает изменения погрешностей статора и ротора по длине АД. Поэтому, если требуется более высокая точность управления ВЗ АД, следует перейти от плоской задачи, где расчет размерной цепи производится для одного произвольно выбранного поперечного сечения АД, к пространственной:

$$\gamma_{\text{удин}} = \frac{a_c(z)b_c(z)}{\left[b_c^2(z) \sin^2(\varphi-2) + a_c^2(z) \cos^2(\varphi-2) \right]^{1/2}} - \frac{a_p(z)b_p(z)}{\left[b_p^2(z) \cos^2 \alpha + a_p^2(z) \sin^2(\alpha) \right]^{1/2}} - e_{cm} \cos \varphi - z_0 \cdot \cos \left[48EJ(\ell^3 mp\omega^2)^{-1} \varphi \right]^{1/2}, \quad (3)$$

где z – координата поперечного сечения АД по оси его вращения; α – угол между текущим радиусом статора или ротора и горизонталью; a_c , a_p , b_c , b_p – главные полуоси поперечных сечений отверстия статора и ротора, рассматриваемые, соответственно, на горизонтальной X и вертикальной Y осях АД.

Для определения долевого вклада точностных конструктивных и эксплуатационных факторов в погрешность воздушного зазора выражение (3) можно преобразовать к виду:

$$\Delta\gamma_{\text{уди}} = \Delta\gamma_n + \Delta\gamma_e + \Delta\gamma_{ke}, \quad (4)$$

где $\Delta\gamma_n = \gamma_n - \Delta\gamma_h$ – отклонение величины ВЗ от номинального значения из-за погрешностей отверстия статора и ротора; $\Delta\gamma_e = -e_{cm} \cos \varphi$ – отклонение величины ВЗ от номинального значения из-за статического эксцентриситета e_{cm} ротора относительно статора;

$$\Delta\gamma_{ke} = -z_0 \cos \sqrt{\frac{48EJ}{\ell^3 mp\omega^2}} \varphi$$

– отклонение величины ВЗ от номинального значения под воздействием конструктивно-

эксплуатационных факторов.

Анализ долевых вкладов различных факторов в суммарную погрешность ВЗ показывает, что наибольшее влияние на отклонение величины зазора от номинала оказывает статистический эксцентриситет ротора ($\Delta\gamma_e = 56\%$), далее следуют погрешности статора и ротора ($\Delta\gamma_n = 35\%$), затем погрешности конструктивно-эксплуатационных факторов ($\Delta\gamma_{ke} = 9\%$).

Для выявления технологических факторов, влияющих на точность ВЗ были проведены статистические исследования процесса формирования ВЗ АД при изготовлении: исследование формирования геометрических параметров станин; исследование напряженно-деформированного состояния сварных станин; исследование влияния нестабильности во времени размеров корпусных деталей и сборочных единиц на точность их геометрических параметров и неравномерность ВЗ; исследование процесса формирования точностных параметров отверстия статора [4, 5].

Типовой технологический процесс изготовления статоров включает в себя следующие операции: гибка листа металла в цилиндр на вальцах; сварку продольного шва обечайки; черновое дропнавание обечайки по внутреннему диаметру, выполняемые с целью удаления сварочного гранта и повышения точности внутренней поверхности, являющейся базовой на операции приварки ребер; приварку к обечайке патрубка ребер, лап, фланцев бобышек, транспортных ушек; чистовое дропнавание станины по внутреннему диаметру; гидравлическое испытание станины на взрывоустойчивость внутренним давлением жидкости с целью проверки прочности и плотности сварных швов.

Кроме того, производят черновую механическую обработку замковых поверхностей, сопрягаемых с подшипниками щитами, фрезерование лап и фланца патрубка, коробки выводов, сверление и нарезание резьбы в отверстиях для крепления подшипниковых щитов, сверление отверстий в лапах. После изготовления станины поступают на сборку с сердечниками статоров. После запрессовки в станину сердечника на базе отверстия последнего производят чистовую обработку замковых поверхностей станины.

В результате исследований определены основные закономерности формирования точностных параметров статор-комплекта ВАД.

1. В процессе изготовления точность и форма отверстия станин в продольных и поперечных сечениях значительно изменяется и формируется окончательно на операции второго дропнавивания. После дропнавивания погрешности размера и формы отверстия станины в торцевых сечениях значительно превышают погрешности в средних сечениях, что обусловлено явлением "краевого эффекта". После изготовления средний диаметр в торцевом сечении и 14 % в среднем сечении выходит за пределы допуска. Овальность у 25 % станин пре-

вышает допустимое значение; максимальное значение овальности превышает допустимое в 2,7 раза.

2. Построенная по 49 контрольным точкам картина напряженного состояния станин после изготовления характеризуется большими полями растягивающих напряжений и их величинами, превышающими в ряде случаев предел текучести, что обуславливает интенсивные процессы релаксации напряжений и изменения размеров станины во времени.

3. После изготовления станин и подшипниковых щитов к моменту их поступления в собранном двигателе на испытательную станцию значительно изменяются размеры и поля рассеивания составляющих звеньев размерной цепи статического эксцентрикситета ротора, что говорит о необходимости учета этого изменения при проверочных расчетах размерных цепей АД.

4. Рассчитанное увеличение относительной неравномерности ВЗ из-за нестабильности размеров корпусных деталей к моменту поступления изготовленного двигателя на испытательную станцию составляет 10 % для четырехполюсных и 18 % для шести- и восьмиполюсных ВАД.

5. После сборки сердечника статора со станиной статора двигателя не соответствуют требованиям чертежа по точности диаметра статора и имеют овальности отверстия превышающую допустимую.

6. Погрешности размера и формы отверстия сердечника статора после запрессовки в станину имеют значительную корреляционную связь с погрешностями размера и формы наружной и внутренней поверхностей сердечника и внутренней поверхности станины до запрессовки, а также с натягом в сопряжении сердечника со станиной.

Вероятность возникновения погрешностей отверстия сердечника из-за его пластической деформации при запрессовке в станину составляет до 16 %.

Анализ полученных данных дает, что статический эксцентрикситет e_{cm} из-за нестабильности во времени составляющих звеньев размерной цепи (рис. 1) увеличивается на величину Δe_h и определяется согласно расчетной схеме на рис. 2:

$$\Delta e_h = e_u - e_{ob}, \quad (5)$$

где e_u – эксцентрикситет оси вращения ротора относительно оси отверстия статора, обусловленный зазором в сопряжении подшипникового щита со станиной, к моменту поступления двигателя на испытательную станцию, мм; e_{ob} – то же непосредственно после обработки замков станины и подшипниковых щитов, мм.

Возрастание эксцентрикситета ротора в четырехполюсных двигателях составляет 36,8 %, а в шести- и восьмиполюсных 39,4 %.

Следовательно, выражение (5) примет вид:

$$\Delta \gamma_e = (e_{cm} + \Delta e_h) \cos \varphi. \quad (6)$$



Рис. 2. Расчетная схема для определения увеличения эксцентрикситета оси вращения ротора из-за нестабильности во времени размеров корпусных деталей АД: $B_1, B_2, B_7, B_8, B_{11}$ – составляющие звенья размерной цепи эксцентрикситета e_{ob} ; $B'_1, B'_2, B'_7, B'_8, B'_{11}$ – соответствующие звенья размерной цепи эксцентрикситета e_u

Низкая точность геометрических параметров отверстия статора приводит к значительным отклонениям $\Delta \gamma_n$ величины ВЗ от номинального значения. Для снижения этой погрешности необходимо производить обоснованное назначение геометрических параметров и их допусков на параметры станины и сердечник статора.

В настоящее время допуски на овальность отверстия станины назначаются одинаковыми для АД разной полюсности (разная толщина стенки сердечника статора) и разной высоте оси вращения двигателя (различные конструктивные размеры станины и сердечника статора). Поэтому погрешности отверстия сердечника статора после запрессовки в станину будут разными.

Овальность наружной поверхности сердечника статора допуском вообще не регламентируется. Диаметр отверстия сердечника статора до запрессовки в станину и натяг в сопряжении сердечника со станиной назначаются без учета "усадки" отверстия при запрессовке сердечника в станину. Кроме того, обработка отверстия сердечника статоров ВАД с высотой оси вращения 200 мм и более существующей технологией не предусматривается. Поэтому приобретенные погрешности при сборке являются окончательными.

Для обоснованного назначения геометрических параметров и их допусков была разработана математическая модель, отражающая совместное влияние входных геометрических параметров на погрешности отверстия [3, 5].

В итоге исследования получены математические модели изменения овальности $\Delta \rho_n$ и усадки $\Delta \bar{R}_n$ отверстия пакета при запрессовке в станину:

$$\Delta \rho_n = c \left[1 - \frac{1}{\pi} \right] \left[\bar{\Delta}_n + \frac{1}{2} (\rho_{nh} + \rho_{cm}) - \Delta_{ha} \right]; \quad (7)$$

$$\Delta \bar{R}_n = -\frac{c}{2} \left[1 + \frac{1}{\pi} \right] \left[\bar{\Delta}_n + \frac{1}{2} (\rho_{nh} + \rho_{cm}) - \Delta_{ha} \right], \quad (8)$$

где Δ_{ha} – натяг на сторону в сопряжении пакета со

станиной; c – коэффициент, характеризующий влияние конструктивных факторов.

Некруглость ρ_c и средний радиус \bar{R}_c отверстия статора после запрессовки в станину:

$$\rho_c = \rho_n + c \left[1 - \frac{1}{\pi} \right] \left[\bar{A}_n + \frac{1}{2} (\rho_{nh} + \rho_{cm}) - A_{ha} \right]; \quad (9)$$

$$\bar{R}_c = \bar{R}_n - \frac{c}{2} \left[1 + \frac{1}{\pi} \right] \left[\bar{A}_n + \frac{1}{2} (\rho_{nh} + \rho_{cm}) - A_{ha} \right] \quad (10)$$

Анализ полученных математических моделей позволил определить основные закономерности формирования точностных параметров отверстия статора в зависимости от величины натяга и точности параметров станины и сердечника статора. На основании математических моделей разработана методика расчета размеров и допусков геометрических параметров сборочных единиц статора [3, 5]:

Допуск на изменение овальности отверстия пакета статора

$$\delta_{\Delta\rho_n} = \frac{1}{K\rho} \sqrt{\delta_{\rho_c}^2 - K_\rho^2 \delta_{\rho_n}^2}. \quad (11)$$

Допуск на овальность отверстия станины

$$\delta_{\rho_{cm}} = \frac{\sqrt{\delta_{\Delta\rho_c}^2 - \sum_{i=1}^{n-1} \left(\frac{\partial F}{\partial x_i} \right)^2 K_i^2 \omega_i^2}}{\left| \frac{\partial F}{\partial \rho_c} \right| K\rho} \quad (12)$$

Диаметр отверстия пакета

$$D_n = D_c + c \left[1 + \frac{1}{\pi} \right] \left[\bar{A}_n + \frac{1}{2} (\rho_{nh} + \rho_{cm}) + A_{ha} \right] - z \quad (13)$$

где z – припуск на обработку отверстия статора.

Полученные статистико-расчетные данные

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Полетаев В.А., Сорокин А.В., Розенко Н.Г. Управление качеством при проектировании и изготовлении взрывозащищенных асинхронных двигателей. – Кемерово: КузГТУ, 1993. – 357 с.
2. Полетаев В.А., Сорокин А.В. Разработка и исследование методов обеспечения точности выходных энергетических показателей ВАД / Кузбасс. политехн. ин-т. – Кемерово, 1993. – 138 с. – Деп. в ВИНИТИ. – № 2240-В93.
3. Полетаев В.А. Обеспечение точности выходных энергетических показателей взрывозащищенных асинхронных двигателей // Горный журнал, 2000. – № 5. Известия вузов . – С. 136-138.
4. Кулак И.В., Полетаев В.А. Статистические исследования процесса формирования воздушного зазора взрывозащищенного асинхронного двигателя // Прогрессивные технологии и экономика в машиностроении: Труды III Всерос. научно-практической конф. – Юрга: Изд-во ТПУ, 2005. – Т. 1. – С. 48-49.
5. Повышение качества функционирования взрывозащищенных асинхронных электродвигателей на стадии конструкторско-технологической подготовки производства в условиях CALS- технологий // Отчет по ведомственной научной программе "Развитие научного потенциала высшей школы", подпрограмма № 3, раздел № 3.3. – Кемерово: КузГТУ, 2006. – 250 с.

□ Авторы статьи:

Полетаев

Вадим Алексеевич

- докт.техн.наук, проф., зав. каф.
информационных и автоматизиро-
ванных производственных систем

Кулак

Илья Валерьевич

- аспирант каф. информационных и
автоматизированных производст-
венных систем

показывают, что погрешности диаметра и формы отверстия статора более чем на 80 % определяются погрешностью отверстия станины.

Разработанная методика обеспечивает обоснованное корректирование и назначение геометрических параметров АД на стадии изготовления и разработки новых моделей двигателя.

При рассмотрении модели пространственно-го ВЗ (3) разработана методика расчета допустимых погрешностей на формы продольных сечений статора и ротора, обеспечивающая совмещение координат центра группирования средних значений погрешности ПВЗ с координатой середины поля допуска [5]. Допуски $\delta_{p,b}$ на бочкообразность ротора и $\delta_{c,cl}$ на седлообразность отверстия статора рассчитывают по формулам:

$$\delta_{p,b} = \delta_A / K \delta (\mu^2 + 1)^{1/2}; \quad (14)$$

$$\delta_{c,cl} = \mu \delta_{p,b}, \quad (15)$$

где δ_A – допуск на величину ВЗ; $K \delta$ – коэффициент относительного рассеяния бочкообразности ротора; μ – коэффициент, установленный с целью обеспечения экономичности обработки.

Разработанные математические модели формирования точности параметров отверстия статора отражают совместное влияние на точность всех значимых конструктивных и точностных параметров станины и сердечника статора, а также технологических параметров сборки сердечника со станиной. Поэтому полученные модели, являясь дополнением к математической модели ВЗ (3), обеспечивают обоснованное управление точностью на стадиях проектирования и изготовления.