

ФИЗИКА

УДК 621.313

Влияние частоты переменного тока на массогабариты трансформаторов и асинхронных электродвигателей малой мощности*Шогенов А.Х. – академик АМАН*

Частота переменного тока является одним из важнейших параметров, оказывающих существенное влияние на качественные и количественные показатели электроэнергетической системы в целом, каждое её звено, электроустановки и электрооборудование, а через них - на электрифицированные технологические машины и механизмы. Принятые в мировой практике системные (национальные) частоты 50 Гц (в РФ и Европе) и 60 Гц (в США и других странах) никогда, нигде и никем не обосновывались технико-экономически, а сложились исторически. Более того, после их установления была показана эффективность их повышения для электроэнергетической системы в целом и её отдельных элементов [1, 2]. Поэтому в нашей стране дважды поднимался вопрос о целесообразности постепенного перевода всей электроэнергетики на повышенную частоту переменного тока [1, 3]. Однако колоссальные издержки, связанные с этим не позволили осуществиться такому глобальному проекту.

Между тем проведённые за последние 50 лет обширные НИОКР, в том числе автора, по данной проблеме показали эффективность использования переменного тока повышенной частоты для целого ряда автономных электротехнических систем (источники-приёмники) и отдельных электроустановок (источники и приёмники). Вместе с тем, в этих работах используются повышенные частоты широкого диапазона (разброса). К примеру, в лесозаготовительных и деревообрабатывающих отраслях экономики применяются частоты 100, 200, 300 и 400 Гц, в сельском хозяйстве - 150, 200, 300, 400, 500 Гц и др., что затрудняет унификацию электромагнитных устройств, электродвигателей и источников питания, ведёт к значительным издержкам (материальным и временным) при проектировании, изготовлении, эксплуатации и ремонте электроустановок повышенной частоты.

Цель настоящей статьи – показать влияние частоты переменного тока на массогабариты трансформаторов, как типичных представителей статических электромагнитных аппаратов (дросселей, катушек электромагнитных аппаратов, релейной защиты и автоматики), а также на наиболее распространённых в мире трёхфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором (АД), сократить диапазон разброса и дать рекомендации по оптимальным частотам для их типовых рядов и электрическим системам из них.

Но такая цель слишком обширна, ибо трансформаторов и АД великое множество, которые классифицируются по назначениям, мощностям, напряжениям, числам фаз, устройствам обмоток и магнитопроводов, способам охлаждения и др. [4, 5, 6], из которых необходимо выбрать те, которые подлежат рассмотрению ниже.

Известно, что электрооборудование повышенной частоты широко применяется в авиации и флоте, в строительных и дорожных машинах с мотор - колёсами, лесном хозяйстве, деревообрабатывающей отрасли и др., где требуются *малые массогабариты*, высокие частоты (скорости) вращения электромеханических устройств.

Обоснованию целесообразности перевода целого комплекса электрифицированных ма-

шин и механизмов на переменный ток повышенной частоты в аграрном секторе экономики посвящена обширная литература [7]. Однако, если многие из них остались незавершёнными или находятся на стадии разработок, то реально существует большой и самостоятельный класс средств электромеханизации, эффективность перевода которых на повышенную частоту доказана практически. Это – водяные электронасосы, центрифуги (жидкостные сепараторы), ручные электроинструменты и др., с приводными АД повышенной частоты (АДПЧ) *малых мощностей*. Между тем для электроснабжения указанных машин и механизмов не годятся электрические сети переменного тока частотой 50 Гц и 60 Гц. Для них необходимы источники повышенной частоты переменного тока, в которых присутствуют электромагнитные аппараты и устройства, типичными представителями которых являются трансформаторы.

Итак, уточнённая цель настоящей статьи - показать влияние частоты переменного тока на массогабариты трансформаторов, как типичных представителей статических электромагнитных аппаратов и наиболее распространённых в мире трёхфазных асинхронных электродвигателей с короткозамкнутыми роторами малых мощностей, а также дать рекомендации по выбору оптимальных частот для их рядов и систем (источник-приёмник). Ниже под трансформаторами и электрическими машинами *малых мощностей* понимаются мощности от сотен Вт до 10 кВт, которые нашли наибольшее распространение в сельскохозяйственном производстве.

Влияние частоты переменного тока на массогабариты трансформаторов

Трансформаторы малых мощностей (ТММ) подразделяют на три основные группы: силовые, согласующие, импульсные. Нас интересуют в основном силовые *одно- и трёхфазные* ТММ, предназначенные для питания АДПЧ и других силовых установок. В электронике их ещё называют *трансформаторами питания*.

Различают однообмоточные (автотрансформаторы), двухобмоточные и многообмоточные ТММ. Ниже, в качестве базового, рассматриваются *двухобмоточные* ТММ *повышенных частот* $[50(60) < f < 1000 \text{ Гц}]$ и напряжений $U \leq 220 \text{ В}$.

Основным критерием проектирования ТММ является его перегрев, под которым понимают разницу между рабочей температурой θ_p , при которой он эксплуатируется, и температурой окружающей среды θ_c , т.е. $\theta_{\text{п}} = \theta - \theta_c$. Для бытовых ТММ $\theta_{\text{п}}$ не должен превышать 50°C , общепромышленных - может достигать до 80°C и спецаппаратуры: корабельной – до 80°C , наземной – до 100°C , авиационной – до 150°C . ТММ, как правило, сухие, в них теплоотвод затруднён, поскольку нет подвижных частей, способствующих их охлаждению.

Главные составляющие конструкции, определяющие электромагнитную основу ТММ, - это сердечники (магнитопроводы, "стали") и обмотки ("медь"), которые являются его *активными массогабаритами*.

Известны четыре типа магнитопроводов ТММ (рис. 1): броневого (БТ), стержневой (СТ), тороидальный (ТТ) и стержневой трёхфазный (ЗТ). Они могут быть шихтованными (Ш, рис. 1, а, б, в, г) и ленточными (Л, рис. 1, д, е, ж, з).

Ленточные стали ТММ могут быть замкнутыми или разрезанными (разъёмными).

Рис. 1. Конфигурация сердечников ТММ различных типов

Стали ТММ имеют формы: Ш-образные, П-образные, О-образные, Т-образные. Поэтому ленточные стали обозначаются: ШЛ, ПЛ, ОЛ, ТЛ.

Из них наиболее привлекательными являются ОЛ, поскольку потоки рассеяния в них минимальны, а значит минимальны сопротивления индуктивных сопротивлений обмоток. Между тем ТММ со сталями ОЛ или ОШ менее технологичны в конструировании и сборке, да и теплоотвод от них хуже, чем с других магнитопроводов. Поэтому их целесообразно применять при неполном закрытии стали обмотками.

Для силовых ТММ чаще используются электротехнические стали: листовые – горячекатаные марок Э41-Э44 (собираетельно Э4 ...), холоднокатаные марок Э310-Э360 (Э3 ..., их прежнее название - ХВП) и др. К примеру, для низкочастотных ТММ применяются наиболее дешёвые стали Э4 ... толщиной 0,5-0,35 мм, повышенных частот – Э3 ... толщиной 0,35-0,2 мм (в зависимости от допустимых θ_{II}). Получившая ранее распространение ленточная сталь толщиной 0,08 мм *не оправдана*, поскольку потери мощности в ней (от вихревых токов и на гистерезис) не на много ниже, чем в сталях толщиной 0,15-0,2 мм при значительных стоимостях. Чем качественнее сталь, тем выше у них индукция насыщения В, а значит меньше массогабариты электротехнических аппаратов и машин.

В качестве обмоток ТММ, как правило, применяют медные провода круглого сечения с теплостойкими эмалевыми покрытиями.

Заметив, что часть, приведённых выше параметров и характеристик стали и меди ТММ, относятся и к АДПЧ, приступим к изложению теоретико-экспериментальных сведений о первых.

Известно [4, 5, 6], что электромагнитная мощность $S_1 \approx S_2 \approx S_{Tr}$, потребляемая однофазным ТММ (и других мощностей), ЭДС E_1 и ток I_1 первичной обмотки запишутся так

$$S_1 = E_1 I_1, E_1 = \frac{2\pi f w_1 B F_c}{\sqrt{2}} = 4,44 f w_1 B F_c, I_1 = j q_1, \quad (1)$$

где f – частота сети, w_1 – число витков первичной обмотки, В – магнитная индукция в стали, F_c – сечение стали, j – плотность тока в обмотках, q_1 – сечение одного провода обмотки, $F_M = w_1 q_1$ – полное сечение всех витков первичной обмотки.

С учётом значений E_1, I_1, F_M

$$S_1 = 4,44 f B F_c F_M j, \quad (2)$$

откуда

$$F_c F_M = \frac{0,225 S_1}{f B j}. \quad (3)$$

Масса активных составляющих ТММ (без учёта изоляционных материалов), очевидно, будет, если принять равными полные сечения первичной и вторичной обмоток трансформатора

$$G = G_c + G_M = l_c F_c \rho_c + 2 l_M F_M \rho_M = V_c \rho_c + V_M \rho_M,$$

где l_c – суммарная длина стали, l_M – усреднённая длина витка первичной и вторичной обмоток ТММ или меди, ρ_c и ρ_M – удельные массы стали и меди, V_c и V_M – объёмы стали и меди.

Выразив F_c из (3) и подставив в последнее равенство, получим

$$G = \rho_c l_1 = \frac{0,225 S_1}{f B F_M j} + 2 \rho_M l_M F_M. \quad (4)$$

Из (4), очевидно, что активная масса ТММ уменьшается с ростом частоты f . Вместе с тем, при этом уменьшаются l_c , l_M , B , w_1 , F_c и F_M , т.е. V_c и V_M трансформатора. Покажем это.

Из (1) видно, что

$$w_1 = \frac{0,225 E_1}{f B F_c}, \quad (5)$$

которое показывает, что с ростом f уменьшается w_1 . Это значит, что если, например в однофазном ТММ с СТ сталью при $f = 50$ Гц объём обмоток будет V_{M1} , что иллюстрирует рис. 2а) (обмотки вставлены друг в друга и перечёркнуты накрест), то при $f > 50$ Гц $V_{M2} < V_{M1}$. Если при этом толщину (не показан на рис. 2) и высоту стали и зазор между обмотками и "правым" стержнем оставить теми же ($H_1 = \text{const.}$ и $\mathbf{a} = \text{const.}$), то в новом ТММ с V_{M2} , уменьшится ширина, т.е. $L_2 < L_1$ (рис. 2б)). Если же в новом ТММ толщину, $L_1 = \text{const.}$ и $\mathbf{a} = \text{const.}$, то придётся уменьшать высоту до H_2 (рис. 2в)).

Таким образом, *от частоты переменного тока зависит не только масса, но и габариты* ТММ.

Рис. 2. Зависимость массогабаритов ТММ от частоты f .

Кроме этого, при изменении частоты изменяются потери в стали и, как следствие, - тепловой режим ТММ. Поэтому для исследования влияния f на G следует рассчитать

ряд ТММ различных мощностей, например, от 50 Вт до 5000 Вт с различными значениями f и по результатам расчётов сделать необходимые выводы. Для этого существуют соответствующие методы, формулы и программы расчёта ТММ на компьютере.

Однако такие расчёты весьма объёмны, поэтому они не приводятся ниже, а ограничиваются ссылкой на [6, 8, 9], где расчёты ТММ проведены достаточно подробно с количественными примерами.

Вместо них приводится график (рис. 3) зависимости активной массы G ТММ (при $S_1 = \text{const}$) от частоты f , построенный с использованием результатов собственных исследований [8] и исследований других авторов [6, 9, 10 и др.], который даёт искомый результат с погрешностью в пределах допустимых при инженерных расчётах $\pm (10-15\%)$.

Рис. 3. График зависимости массы ТММ от частоты f .

Рис. 3 показывает, что масса G ТММ с ростом частоты f от 50 Гц до 800 Гц падает интенсивно, затем падение замедляется. Так, если при повышении f от 50 Гц до 400 Гц масса трансформатора снижается на 43%, а повышении f от 400 Гц до 800 Гц - на 23%, то при повышении f от 800 Гц до 1200 Гц - лишь на 6%. Отсюда можно сделать вывод, что *оптимальная частота* ТММ лежит между 400 Гц и 800 Гц.

Заметив, что сделанный вывод легко распространяется и на трёхфазные ТММ, укажем, что при этом, чтобы не допустить превышения температуры выше $\theta_{\text{П}} = 50^{\circ}\text{C}$, приходится снижать магнитную индукцию B от 1,6 Т (при $f = 50$ Гц) до 0,63 Т (при $f = 400$ Гц). При частоте же $400 > f > 800$ Гц, $B < 0,63$ Т, из-за чего темп снижения G замедляется.

Кроме этого, когда он питает силовую нагрузку, например АДПЧ, для которого, как будет показано ниже, оптимальной является $f = 400$ Гц, *следует считать оптимальной и для силовых ТММ* $f_{\text{Опт.ТММ}} = 400$ Гц.

Представляет также интерес зависимость мощности ТММ S_1 от частоты f при $G = \text{const.}$, что достаточно подробно исследовано в [6]. К примеру, на одном и том же магнитопроводе ПЛ и обмотках массой $G = 3,4$ кг можно получить трансформатор мощностью $S_1 = 250$ ВА при $f = 50$ Гц, $B = 1,6$ Т, $j = 1,9$ А/мм² и мощностью $S_1 = 890$ ВА при $f = 400$ Гц, $B = 0,85$ Т, $j = 1,5$ А/мм². С трансформатора же массой $G = 16,8$ кг и $S_1 = 1600$ ВА при $f = 50$ Гц, $B = 1,6$ Т, $j = 1,2$ А/мм² можно “выжать” мощность $S_2 = 4600$ ВА при $f = 400$ Гц, $B = 0,65$ Т, $j = 1,1$ А/мм².

Таким образом, при переходе с $f = 50$ Гц на $f = 400$ Гц мощность ТММ возрастает, а массогабариты уменьшаются, примерно, в 3-3,5 раз, а переходе на $f \leq 800$ Гц - 3,5-4 раз, но при относительно низких B . Это подтверждает, сделанный выше вывод, о том, что *оптимальная частота* ТММ $400 < f < 800$ Гц.

Влияние частоты переменного тока на массогабариты асинхронных электродвигателей

При подведении трёхфазного напряжения U к АДПЧ по его обмоткам протекают токи I_1 , возбуждающее в статоре вращающееся магнитное поле, которое в основном сосредотачивается в воздушном зазоре, внедряясь в статор и ротор, пересекая их обмотки. Оно наводит на обмотке статора ЭДС $E_1 = 4,44fw_1BF_c$. Напряжение U уравнивается E_1 и падением напряжения на обмотке статора. Пренебрегая последним, ввиду его малости, можно считать, что $U \approx E_1 = 4,44fw_1BF_c$. Тогда электромагнитная мощность S , потребляемая трёхфазным АДПЧ (АД), если U и I_1 – фазные напряжение и ток, запишется так [4, 5]

$$S = 3UI_1 \approx 13,32fBF_cF_Mj, \quad (6)$$

где F_c – площадь поперечного сечения статора, $F_M = w_1q_1$ – площадь сечения всех витков обмотки статора, B – магнитная индукция в воздушном зазоре.

Из (6) очевидны

$$F_cF_M = \frac{0,075S}{fBj} \quad \text{и} \quad F_c = \frac{0,075S}{fBF_Mj}, \quad (7)$$

показывающие, что габариты АДПЧ уменьшаются с повышением частоты.

Масса активных составляющих АД (без учёта изоляционных материалов), очевидно, будет

$$G = G_c + G_M = L\rho_cF_{cp} + l_M\rho_MF_{Mcp} = V_c\rho_c + V_M\rho_M, \quad (8)$$

где L – длина статоров статора и ротора, $F_{cp} = (F_c + F_p) \approx 2F_c$ – суммарная площадь поперечного сечения статора и ротора без площади поперечного сечения вала ротора, l_M – усреднённая длина витка статора и ротора или меди (хотя обмотка ротора обычно – алюминиевые стержни), F_{Mcp} – площадь поперечного сечения всех обмоток статора и ротора.

Выражение (8) с учётом (7) и $F_{cp} \approx 2F_c$ запишется так

$$G \approx \rho_c L \frac{0,15S}{fBF_M} + \rho_M l_M F_{Mcp}, \quad (9)$$

откуда видно, что масса АДПЧ G будет уменьшаться с ростом f .

Таким образом, габариты и масса асинхронных двигателей уменьшаются с ростом частоты переменного тока, что иллюстрируют (7) и (9), а также таблица 1, в которой D – внешний диаметр АД (АДПЧ).

Таблица 1. Каталожные данные АД типов ДАТ 42271 и ДАТ 21670

Тип АД(АДПЧ)	P , Вт	U , В	f , Гц	n , об/м	G , кг	D , мм	L , мм
ДАТ 42271	25	220	50	3000	1,15	60	118
ДАТ 21670	25	220	400	12000	0,26	40	73

Из таблицы 1 видно, что 3-фазные АД с одинаковыми мощностями и напряжениями, тяжелее и габаритнее (D^2L) АДПЧ в 4,4 и 3,6 раз соответственно.

Подробный расчёт АД всех типов, в том числе АДПЧ, приводятся в [5, 11 и др.]. Но он объёмнее и сложнее, чем расчёт ТММ, поэтому не приводится здесь.

Тенденцию снижения массогабаритов АД от частоты f можно проследить следующим образом.

Линейные размеры стали R_c и меди R_m геометрически подобных АД (АДПЧ) в квадратах R_c^2 и R_m^2 пропорциональны площадям F_c и F_m и в четвёртой степени их произведению, т.е. $R_c^2 R_m^2 = k_1 R^4 = F_c F_m$. С учётом этого (6) можно переписать так

$$S = k_{cm} f B j R^4, \quad (10)$$

где $k_{cm} = 13,32k_1$ – коэффициент пропорциональности. Если рассматривать ряд АДПЧ возрастающей мощности, подобных друг другу по своим геометрическим формам и считать B и j одинаковыми у всех, а их усреднённое произведение Bj учесть в коэффициенте k_{cm} , то (10) примет вид

$$S = k_{cm} f R^4,$$

откуда

$$R = \sqrt[4]{\frac{s}{k_{cm} f}} = \left(\frac{s}{k_{cm} f}\right)^{0,25}. \quad (11)$$

Из (8), очевидно, что масса активных материалов АД G пропорциональна объёму, т.е. кубу линейного размера R^3 , поэтому для ряда подобных машин, с учётом (11), можно записать

$$G = k_v R^3 = k_v \left(\frac{s}{k_{cm} f}\right)^{0,75} = \frac{k_v}{k_{cm}^{0,75}} \left(\frac{s}{f}\right)^{0,75} = k(S/f)^{0,75}, \quad (12)$$

где $k = k_v/k_{cm}^{0,75}$ – коэффициент пропорциональности.

Формула (12) устанавливает зависимость активной массы АДПЧ (и трансформатора) от частоты при известной мощности S . Более того, с помощью неё можно вести прикидочные расчёты активной массы безредукторных АДПЧ, если известно значение коэффициента k , который, в свою очередь, меняется в широких пределах внутри конкретных серий АДПЧ: ДАТ, ДМЧ, ДРЧ, ДФ, ДФО, ДМЧФ, АОЛ, ДФВ и др. Поэтому есть смысл установить методику его расчёта для подобных рядов АДПЧ.

Из (12), очевидно, что

$$k = G(f, S)^{0,75}. \quad (13)$$

При известном типе АДПЧ, его массе, частоте и мощности, по (13) определяем коэффициент k , после чего по (12) рассчитываем активную массу G для ряда двигателей, подобных исходному. Покажем это.

Пример 1. Для АДПЧ типа ДАТ 2500-8 известно, что $G = 16,8$ кг, $f = 400$ Гц и $S = 2500$ Вт. Исходя из этого по (13) находим $k = 16,8(400/2500)^{0,75} = 4,25$. С учетом этого по (12), преобразованной в $G \approx 4,25(S/f)^{0,75}$, рассчитываем массы подобных ДАТ 21270, которые сведены в таблицу 2.

Таблица 2. Зависимость массы АДПЧ типа ДАТ 2500-8 от частоты

f , Гц	50	100	200	400	600	800
G , кг	79,91	47,52	28,25	16,8/16,8	12,39	9,99

Пример 2. Для АДПЧ типа ДЧРВ 80-1-6 известно, что $G = 5,2$ кг, $f = 400$ Гц и $S = 2200$ Вт. Исходя из этого по (13) находим $k = 5,2(400/2200)^{0,75} \approx 1,45$. С учетом этого по $G \approx 1,45(S/f)^{0,75}$ рассчитываем массы ДЧРВ 80-1-6 подобных АДПЧ, которые сведены в таблицу 3.

Таблица 3. Зависимость массы АДПЧ типа ДЧРВ 80-1-6 от частоты

f , Гц	50	100	200	400	600	800
G , кг	24,8	14,7	8,8	5,2/5,2	3,8	3,1

На рис. 4 представлены зависимости G от f , построенные по расчётным данным таблиц 2 (Т2) и 3 (Т3), которые показывают, что активные массы АДПЧ после частоты $f > 400$ Гц резко замедляют снижение G .

Рис. 4. График зависимостей массы АДПЧ от частоты f .

Несмотря на привлекательные результаты расчётов активных масс АДПЧ по (12), она (формула) завышает G , примерно, на 15-20%, поскольку при выводе (12) считались $B = \text{const}$ и $j = \text{const}$ для типового ряда АД(АДПЧ), что верно лишь приблизительно, а также по (12) рассчитывались их активные массы, а в качестве контрольных брались массы реальных машин (с корпусами). С учётом этого из таблицы 2 – $0,8 G_{50}/G_{400} = 0,8 \cdot 79,91/16,8 \approx 3,8$, из таблицы 3 – $0,8 G_{50}/G_{400} = 0,8 \cdot 24,8/5,2 \approx 3,8$. Таким образом, масса АД при $f = 50$ Гц снижается в 3,5-4 раза при $f = 400$ Гц. Словом оптимистические ожидания 60-ых годов минувшего века в том, что при повышении частоты до 400 Гц массы АДПЧ малых мощностей, например, приводного двигателя электростригальной машинки мощностью 120 Вт, снижается в 13,5 раз [7], были явно завышенными (примерно в 3,5 раза).

Повторимся: для достоверных расчётов ТММ и АДПЧ надо пользоваться [5, 6, 8, 9, 11], а прикидочных расчётов их активных масс - (12), предварительно определив коэффициент k из (13).

Кроме этого, теория и практика показывают, что АДПЧ можно создавать и на частоты $f > 400$ Гц., но, во-первых, при этом, чтобы температурный перегрев $\theta_{\text{П}}$ оставался бы в пределах нормы, приходится сильно снижать магнитную индукцию B , поэтому снижение массы резко замедляется, что иллюстрирует рис. 4 и таблицы 2 и 3. Например, если при повышении частоты с 200 Гц до 400 Гц масса G в таблице 3 снижается на 3,6 кг (41%), то с 400 Гц до 600 Гц – 1,4 кг (27%), а с 600 Гц до 800 Гц – на 0,7 кг (18%) и т.д. Во-вторых, на практике большинство электрифицированных установок не требуют частот вращения (синхронных) выше 12000 об/мин [7, 12]. Поэтому для типовых рядов АДПЧ малых мощностей можно считать оптимальными $f_{\text{оптАДПЧ}} = 400$ Гц.

Для отдельных случаев, когда требуются частоты выше 400 Гц, придётся создавать специальные АДПЧ, но это уже сфера спецтехники, т.е., как известно, практически нет правил без исключения. Когда потребуются АДПЧ с частотами (скоростями) вращения ниже 12000 об/мин, например, для приведения в работу электростригальных машинок, то следует использовать 6-ти полюсные АДПЧ или применять соответствующие редукторы, вделанные в машинку ("мотор-редукторы"), целесообразность которых доказана давно [12].

Для электрифицированных машин и механизмов, желательные частоты которых ниже 400 Гц, например, 150 Гц для молочных сепараторов, не стоит создавать специальные преобразователи, тем более громоздкие и материалоемкие ферромагнитные умножители частоты (их массогабариты в 3-4 раза выше, чем трансформаторов соизмеримых мощностей), как это рекомендовалось в те же 60-ые годы [7], поскольку сегодня существуют транзисторные преобразователи частоты с плавным пуском и регулируемыми выходными напряжениями и частотами, которые можно настраивать на любые частоты от 50 Гц до 400 Гц. У большинства отечественных и зарубежных преобразователей потолок частот, как правило, 400 Гц, что также говорит о том, что для машин и аппаратов малых мощностей $f_{\text{опт}} = 400$ Гц.

В заключение некоторые замечания по конструктивным особенностям, которые следует учитывать при создании электрифицированных машин и механизмов с приводными АДПЧ. Известно [4, 5 и др.], что мощность электрической машины связана с его геометрическими размерами, электромагнитной нагрузкой и частотой вращения ротора соотношением $S = cD_{\text{В}}^2LAB\omega$, откуда $D_{\text{В}}^2L = S/cAB\omega$, где c - коэффициент пропорциональности или конструктивная постоянная машины, $D_{\text{В}}$ - внутренний диаметр статора, A - линейная токовая нагрузка (А/м), $\omega = \pi n/30$. Из приведённого, очевидно, что активный габарит машины $D_{\text{В}}L$, а значит и масса уменьшаются с ростом скорости вращения АДПЧ, поскольку улучшается охлаждение её из-за увеличения интенсивности обдува. Между тем не столь разительно как хотелось бы. Например, масса АДПЧ на 400 Гц мощностью 200...7000 Вт в 3,5-4 раза ниже по сравнению с массой АД на 50 Гц, что отмечалось выше. Или масса асинхронного двигателя на 400 Гц меньше массы аналогичного двигателя на 200 Гц в среднем на 30...35%, но не на 40-45%.

Сдерживающими тому факторами являются: потери в стали (отмечались выше), корпуса машин, обмотки и особенно вылеты их лобовых частей, ресурсы работы подшипников, редукторов и др. Так, с ростом частоты и мощности АДПЧ, не адекватно меняются указанные величины, например, интенсивно растут не только потери в стали, но и длина лобовых частей обмотки статора, массогабариты редукторов, существенно снижается ресурс работы подшипников и т. д. Исходя из этого с точки зрения массогабаритов, энергоёмкости и надёжности оптимальными являются 2-х, 4-ёх и 6-ти полюсные АДПЧ или редукторные машины.

Известно, что с ростом передаточного числа растут и массогабариты редукторов. Однако масса системы АДПЧ-редуктор в зависимости от скорости вращения ротора, меняясь по вогнутой кривой, имея минимум при 8000...10000 об/мин [12].

Из всевозможных редукторов в электроинструментах повышенной частоты, как правило, применяются одноступенчатые и двухступенчатые с зубчатыми передачами, как с внешними, так и внутренними зацеплениями. При этом в качестве шестерней (меньшее колесо) зачастую выступают концы стальных валов роторов АДПЧ, а колёса изготавливают из стальных же или полимерных материалов. Известно, что достоинств редукторов с зубчатыми передачами много, в том числе постоянство передаточного числа (отсутствие проскальзывания) и их работа в широком диапазоне частот вращения, что очень важно для электроинструментов различных применений.

Некоторые электроинструменты повышенной частоты, работающие со встроенными в рукоятку АДПЧ, должны быть удобными для обхвата руками. В связи с этим зачастую возникает необходимость конструировать АДПЧ малого диаметра и вытянутыми в длину. Вследствие этого оптимизируются отношения L/D и D/D_B . Например, для электростригальных машинок эти оптимумы лежат в пределах: $L/D = 0,6...0,9$ и $D/D_B = 0,58...0,62$ при $p = 2$; $L/D = 0,5...0,8$ и $D/D_B = 0,64...0,66$ при $p = 3$ [8].

Общие выводы:

1. Теоретически и экспериментально показано и доказано, что с увеличением частоты переменного тока массогабариты электромагнитных аппаратов, типичными представителями которых являются трансформаторы, а также трёхфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором малых мощностей снижаются в 3-3,5 и 3,5-4 раз соответственно при $f_{\text{опт}} = 400$ Гц.

2. Предложен упрощённый метод предварительной оценки активной массы трансформаторов и трёхфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором малых мощностей в зависимости от частоты.

3. Даны практические рекомендации по оптимальным частотам для типовых рядов трёхфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутыми роторами малых мощностей, а также по их основным конструктивным параметрам, которые следует учитывать при их создании.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кулебакин В.С. Применение 100-периодного тока для электрификации СССР // Электричество. 1933. № 5. С. 9-21.
2. Петров Г.Н. Проблема повышения частоты и трансформаторостроение // Электричество. 1936. № 2. С. 7-15.
3. Кулебакин В.С., Венников В.А. Повышение частоты переменного тока и нахождение её оптимального значения для дальнейшей электрификации СССР // Электричество. 1963. № 3. С. 9-14.
4. Копылов И.П. Электрические машины. М.: Юрайт. 2015. 676 с.
5. Ермолин Н.П. Электрические машины малой мощности. М.: Высшая школа. 1975. 504 с.
6. Балъян Р.Х. Трансформаторы для радиоэлектроники. М.: Советское радио. 1971. 720 с.
7. Всесоюзные научно-технические конференции (1-5-ая) по применению высокоскоростных машин с электроприводом повышенной частоты тока в сельском хозяйстве и других отраслях народного хозяйства. Сб. докл. и сообщ. Орджоникидзе и Краснодар. 1965-1974. 1952.
8. Шогенов А.Х. Транзисторные преобразователи для питания электроинструментов повышенной частоты тока сельскохозяйственного назначения. М.: Агроконсалт. 2002. 196 с.

9. Белопольский И.И., Пикалова А.Г. Расчёт трансформаторов и дросселей малой мощности. М.: Госэнергоиздат. 1963. 272 с.
10. Бертинов А.И. Авиационные электрические генераторы. М.: Оборонгиз. 1959. 594 с.
11. Копылов И.П. и др. Проектирование электрических машин. М.: Юрайт. 2016. 767 с.
12. Мякишев Н.Ф. Исследование приёмов использования повышенной частоты в некоторых сельскохозяйственных машинах // Автореферат дис. ... канд. т.н. М.: МСХА. 1963. 17 с.

ABSTRACT

Theoretical and experimental data obtained as a result of years research of electricity field in MYISP, GSHI, KBSU, CBMI (KBHOW), CBIB and MP "Electrotechnology that with the increase of the frequency in the alternating current to $f_{\text{опт}} = 400\text{Hz}$ massogabarity of transformers decrease 3-3,5 times, and AD 3.5-4 times compared to the frequency of 50(60) Hz.

A simplified method for preliminary evaluation of active mass decrease in low power asynchronous motors with frequency increase.

The recommendations are provided for the rational design of electric machines and mechanisms with low power asynchronous motors as frequency increase.

Keywords. Electromagnetic devices, transformers, induction motors, system frequency, higher frequency, reducing mesohabitat.

Kabardino-Balkarian State University, Nalchik; shah3636@mail.ru

© А.Н. Shogenov, 2016

АННОТАЦИЯ

Приведены теоретические и экспериментальные данные, полученные в результате многолетних исследований в области электроэнергетики в МИИСП, ГСХИ, КБГУ, КБАМИ (КБ-ГАУ), КБИБ и МП "Электротехнология о том, что с увеличением частоты переменного тока до $f_{\text{опт}} = 400\text{Гц}$ массогабариты трансформаторов снижаются в 3-3,5 раза, а АД в 3,5-4 раз по сравнению с частотой 50(60) Гц. Предложен упрощённый метод предварительной оценки снижения активной массы асинхронных двигателей малых мощностей с повышением частоты. Приведены рекомендации по рациональному конструированию электрифицированных машин и механизмов с приводными асинхронными двигателями малых мощностей повышенной частоты.

Ключевые слова. Электромагнитные аппараты, трансформаторы, асинхронные двигатели, системные частоты, повышенная частота, снижение массогабаритов.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение Высшего профессионального образования "Кабардино -Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова", г. Нальчик; shah3636@mail.ru

© А.Х. Шогенов, 2016