

А. Б. Красовский, М. Г. Бычков

К ВОПРОСУ О ПОЛОЖЕНИИ ТОЧКИ НОМИНАЛЬНОГО РЕЖИМА НА МЕХАНИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКЕ ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Рассмотрена связь формы фазного тока номинального режима работы вентильно-индукторного двигателя с основными управляющими воздействиями и параметрами привода. На базе результатов моделирования обоснованы условия согласованного изменения числа витков фаз и параметров коммутации вентильно-индукторного двигателя при комплексном проектировании привода, обеспечивающие заданные значения момента и скорости при различной форме фазного тока. Приводятся результаты исследования влияния формы фазного тока на установленную мощность инвертора, коммутирующего его фазы, а также на обмоточные данные и потери в меди.

Одним из важных этапов рационального проектирования электродвигателя любого типа является обоснованный выбор условий номинального режима его работы [1]. Этот режим характеризуется полным использованием двигателя по теплоте и устанавливает некоторое однозначное соотношение между параметрами двигателя, управления и нагрузки при стремлении достичь наилучших массогабаритных и энергетических показателей. Кроме того, положение точки номинального режима на механических и электромеханических характеристиках привода позволяет судить о его регулировочных свойствах, перегрузочной способности и других свойствах с учетом возможностей системы управления. Условия номинального режима работы двигателя в общем случае достигаются соответствующим выбором материалов, геометрии магнитной системы, обмоточных данных, токовой нагрузки, системы охлаждения.

В традиционных двигателях с изменением режима работы форма их фазных токов изменяется относительно мало, поэтому среди факторов, определяющих условия номинального режима работы, она обычно не рассматривается. В вентильно-индукторных двигателях (ВИД), получающих в последние годы все большее распространение в различных технологических установках, в силу особенностей их работы, форма фазных токов может изменяться значительно и во многом определяет их свойства, поэтому вопрос о рациональной форме фазного тока на номинальном режиме работы ВИД имеет особое значение.

В ряде работ исследовано влияние формы импульсов фазного тока на эффективность электромеханического преобразования энергии ВИД

и на другие важнейшие показатели, такие как уровень пульсаций мгновенного электромагнитного момента и связанные с ним виброакустические характеристики привода, его предельные энергетические возможности и регулировочные свойства [2–7].

Однако исследования касались, в основном, оптимизации тех или иных показателей привода с предварительно выбранным двигателем, т.е. когда его параметры неизменны, а необходимый эффект достигается лишь средствами управления. Если же решается задача комплексного проектирования электропривода, наряду с главными размерами активной части двигателя, в число оптимизируемых должны быть включены и другие его параметры: обмоточные данные, объемы активных материалов и потери в них, а также установленная мощность инвертора, коммутирующего фазные обмотки, и т.п. Взаимосвязь же отмеченных параметров ВИД с формой фазного тока в технической литературе освещена не достаточно.

Опыт показывает, что одно и то же среднее значение момента ВИД при заданной скорости может быть получено при различных формах фазного тока. Для этого необходимо, в общем случае, согласованное изменение параметров коммутации обмоток и соотношения между напряжением питания U и угловой скоростью ω [8, 9]. Однако при неизменном напряжении питания $U = U_{\text{ном}} = \text{const}$ и фиксированных параметрах двигателя нельзя получить для заданной скорости одно и то же среднее значение момента при разной форме тока без изменения числа витков или геометрических размеров ВИД. Это изменение возможно только на этапе проектирования двигателя.

В настоящей работе ограничимся исследованием возможностей получения заданного режима работы ВИД только в силу изменения числа витков обмотки и параметров управления.

Постановка задачи. Типовая механическая характеристика электропривода при неизменных параметрах коммутации и напряжении питания ВИД показана на рис. 1, кривая 1 [10]. На этой характеристике обычно указывают базовую скорость $\omega_{\text{баз}}$, которая разделяет весь скоростной диапазон работы привода на две характерные зоны. В зоне относительно небольших скоростей ($\omega < \omega_{\text{баз}}$) напряжение на фазе U меньше номинального $U_{\text{ном}}$, работает регулятор тока и изменение уровня и формы тока возможно за счет изменения задания тока. В этой зоне обычно стремятся к полной загрузке инвертора по току и к максимальному использованию двигателя для создания момента, чтобы обеспечить постоянство фазного тока и момента ВИД с началом перекрытия взаимодействующих зубцов статора и ротора.

Во второй зоне механической характеристики при $\omega > \omega_{\text{баз}}$ действие регулятора тока прекращается, и к фазам двигателя прикладываются

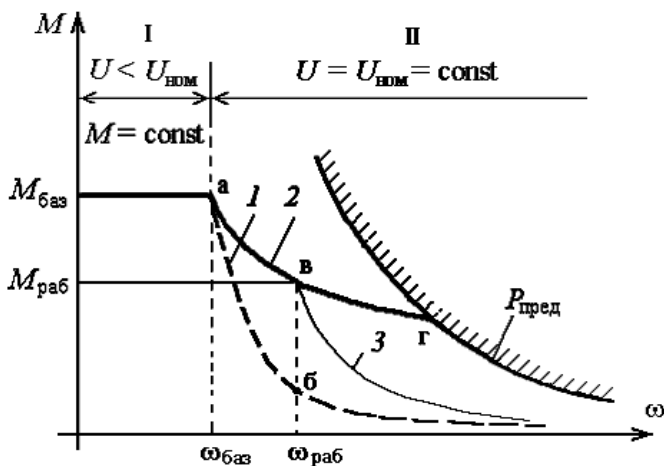


Рис. 1. Механические характеристики ВИД

ется неизменное напряжение питания $U = U_{\text{ном}} = \text{const}$. В этой зоне основными управляющими воздействиями на фазный ток становятся углы включения $\theta_{\text{вкл}}$ и коммутации $\theta_{\text{ком}}$ (начала отключения работавшей фазы, рис. 2). Форма фазного тока ВИД зависит от соотношения U и ω , длительности интервалов включения $\gamma_{\text{вкл}} = (\theta_{\text{рас}} - \theta_{\text{вкл}})$, работы $\gamma_{\text{раб}} = (\theta_{\text{ком}} - \theta_{\text{рас}})$ и отключения фазы $\gamma_{\text{откл}} = (\theta_{\text{ком}} - \theta_{\text{откл}})$, а также от степени локального насыщения зубцового слоя, где $\theta_{\text{рас}}$ — угол начала перекрытия зубцов; $\theta_{\text{откл}}$ — угол спада тока до нуля.

Известно, что при неизменных параметрах коммутации рост скорости выше $\omega_{\text{баз}}$ (например, до точки “б” кривой 1, см. рис. 1) приводит к довольно резкому уменьшению амплитуды и среднего значения фазного тока ВИД, причем на рабочем интервале $\gamma_{\text{раб}}$ он становится спадающим (кривая 1б, см. рис. 2) [3]. Форму фазного тока с его уменьшением в пределах $\gamma_{\text{раб}}$ будем называть “треугольной” и отметим индексом “Л”. При этом средние момент и выходная мощность ВИД также снижаются (участок II кривой 1, см. рис. 1). Поэтому при постоянных параметрах коммутации максимальную мощность ВИД развивает при $\omega = \omega_{\text{баз}}$, т.е. в точке “а” характеристики 1.

Однако ранее было показано, что при $\omega > \omega_{\text{баз}}$ увеличение $\gamma_{\text{вкл}}$ из-за более раннего включения фазы позволяет обеспечить постоянство выходной мощности ВИД в некотором диапазоне изменения скорости [8]. Более того, при сохранении амплитуды импульса тока $I_{\text{м}}$ на уровне базового режима (кривая 2в, см. рис. 2) можно даже увеличить выходную мощность ВИД по сравнению с базовым режимом [12]. Это объясняется тем, что при переходе к треугольной форме фазного тока уменьшается запас магнитной энергии к моменту начала отключения фазы $\theta_{\text{ком}}$, что увеличивает эффективность электромеханического пре-

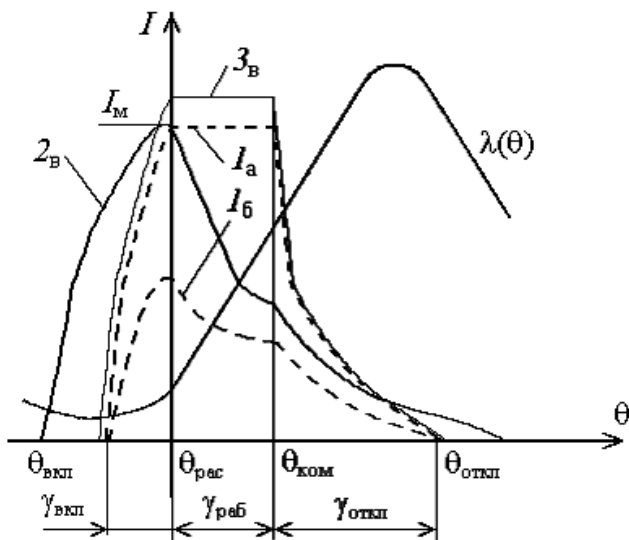


Рис. 2. Форма фазного тока ВИД в различных точках механических характеристик

образования энергии в ВИД [3, 4]. Поэтому происходит рост выходной мощности без увеличения потребляемой мощности.

Максимальная выходная мощность с сохранением амплитуды фазного тока на уровне базового режима достигается в точке “г” на кривой I (см. рис. 1), где механическая характеристика ограничивается кривой предельной мощности $P_{\text{пред}}$ [11]. Длительная работа ВИД в этой точке нецелесообразна, поскольку любое, даже очень малое увеличение либо $\gamma_{\text{вкл}}$, либо $\gamma_{\text{рвб}}$ по отношению к этому режиму приведет к одновременному увеличению $\gamma_{\text{откл}}$. Это нарушит нулевые начальные условия для тока и потока включаемой фазы, т.е. начальное значение потока будет возрастать с каждым циклом коммутации. В результате среднее значение потока также будет возрастать, что приведет к общему насыщению магнитной системы двигателя и снижению момента. Более подробно работа ВИД в этой точке рассмотрена в работе [11].

Рассмотрим два варианта выполнения ВИД с одинаковыми выходной мощностью, скоростью и напряжением питания, имеющих одинаковую магнитную систему, но отличающихся числом витков. В качестве основных критериев сравнения будем использовать амплитудные и действующие значения фазных токов, коэффициент электромеханического преобразования энергии, электрические потери в меди обмоток, а в качестве дополнительного условия может быть использовано требование постоянства плотности тока, или постоянства электрических потерь (КПД), или неизменность сечения окна под обмотку.

Предположим, что в *первом варианте* исполнения двигателя число витков и угол включения $\theta_{\text{вкл}}$ выбраны так, что в базовой точке “а” характеристики I (см. рис. 1) при $\omega = \omega_{\text{баз}}$ на интервале $\gamma_{\text{раб}}$ обеспечено постоянство фазного тока $I(\theta)$ на некотором уровне $I_{\text{м}}$ (кривая 1а (см. рис. 2). Форму фазного тока ВИД с его постоянством на интервале $\gamma_{\text{раб}}$ далее будем условно называть “прямоугольной” и отметим индексом “П”.

Таким образом, в *первом варианте исполнения ВИД* примем, что точка его номинального режима располагается в некоторой промежуточной точке “в” между точками “а” и “г” кривой 2 (см. рис. 1) с координатами $\omega_{\text{раб}}$, $M_{\text{раб}}$. Подчеркнем, что в первом варианте в точке “в” с координатами $\omega_{\text{раб}}$ и $M_{\text{раб}}$ фазный ток ВИД имеет треугольную форму (кривая 2в, см. рис. 2), причем, чем больше $\omega_{\text{раб}}$ превышает $\omega_{\text{баз}}$, тем быстрее фазный ток спадает на рабочем участке и тем сильнее выражен треугольный характер его изменения в пределах цикла коммутации. Таким образом, отношение $\omega_{\text{раб}}/\omega_{\text{баз}}$ в некоторой степени может быть мерой искажения формы фазного тока по сравнению с прямоугольной.

С другой стороны, очевидно, что при проектировании ВИД можно при том же напряжении питания $U_{\text{ном}}$ так выбрать обмоточные данные (число витков и схему соединения катушек в обмотке) и значение углового интервала $\gamma_{\text{вкл}}$, что рабочая точка “в” с координатами $M_{\text{раб}}$ и $\omega_{\text{раб}}$ совпадет с базовым режимом механической характеристики 3 на рис. 1. Тогда, форма фазного тока ВИД в точке “в” на кривой 3 будет прямоугольной (кривая 3в на рис. 2).

Это соответствует *второму варианту* исполнения ВИД. При этом, сравнивая условия работы ВИД по первому и второму вариантам в одной и той же точке “в” (см. рис. 1), можно оценить изменение максимальных и действующих значений токов в фазе, изменение эффективности электромеханического преобразования энергии, объема меди, потерь в меди, площади сечения окна стали и т.д. Такое сравнение позволит сделать более обоснованный вывод о рациональной форме фазного тока для номинального режима работы ВИД.

Прежде всего, выясним, как должны быть изменены число витков фазных обмоток и параметры коммутации проектируемого двигателя по второму варианту по отношению к параметрам двигателя, исполняемого по первому варианту, чтобы в номинальном режиме ток в фазах был прямоугольной формы.

Условия обеспечения прямоугольной формы фазного тока ВИД. Воспользуемся известным выражением для фазного тока на рабочем этапе цикла коммутации ВИД $\gamma_{\text{раб}}$ в режиме локального насыщения [8, 9]:

$$I(\theta) = (I_1 + (K_\lambda - 1))(I_{уст} - I_{нас}) \frac{\theta - \theta_1}{\theta_2 - \theta_1}, \quad (1)$$

где $I_1 = \frac{U(\theta_{рас} - \theta_{вкл})}{\omega w^2 \lambda_{рас}}$ — ток в фазе в момент перекрытия зубцов статора и ротора при угле $\theta_{рас}$; $I_{уст} = \frac{U(\theta_2 - \theta_1)}{\omega w^2 \lambda_{рас}(K_\lambda - 1)}$ — установившееся значение тока при работе в линейном режиме; $I_{нас}$ — ток в фазе, при котором наступает локальное насыщение; w — число витков фазы; $\theta_{согл}$ — угол полного перекрытия зубцов; $K_\lambda = \lambda_{макс}/\lambda_{рас}$; $\lambda_{макс}$, $\lambda_{рас}$ — магнитные проводимости воздушного зазора между зубцами статора и ротора при углах $\theta_{согл}$ и $\theta_{рас}$ соответственно.

Из уравнения (1) следует, что условие постоянства тока на рабочем интервале $I(\theta) = \text{const}$ выполняется при $I_{уст} = I_{нас}$. Опыт показывает, что на режиме локального насыщения ВИД можно принять $I_{нас} = \text{const}$. Установившееся же значение тока $I_{уст}$, как видно, убывает обратно пропорционально росту скорости. Однако из приведенных выражений также следует, что для любой рабочей скорости на этапе проектирования ВИД условие $I_{уст} = I_{нас}$ может быть обеспечено соответствующим изменением числа витков фазной обмотки.

Введем дополнительные обозначения: w_Δ — число витков фазы двигателя с треугольной формой тока, w_Π — число витков фазы двигателя с прямоугольной формой тока. Нетрудно видеть, что если выполнено условие

$$\frac{w_\Pi}{w_\Delta} = \sqrt{\frac{\omega_{раб}}{\omega_{баз}}}, \quad (2)$$

то ток в фазе двигателя, проектируемого по второму варианту, при скорости $\omega_{раб}$ имеет прямоугольную форму.

Чтобы среднее значение момента двигателя при переходе к прямоугольной форме фазного тока осталось неизменным, необходимо соответствующим образом изменить длительность интервала включения его фазы $\gamma_{вкл}$ по отношению к $\gamma_{вкл,баз}$. Однако при определении закона изменения $\gamma_{вкл}$ в каждом конкретном случае нужно учитывать конфигурацию магнитной геометрии ВИД, число его фаз, что аналитически трудно реализовать.

Наиболее удобным средством проведения дальнейших исследований является математическое моделирование. С этой целью была разработана имитационная модель коммутационных процессов ВИД на базе математического пакета MATLAB-SIMULINK [12, 13]. Модель позволяет регистрировать изменение амплитудного, действующего и среднего значений фазного тока двигателя, а также потребляемую каждой

фазой в цикле коммутации электрическую энергию $W_{эл}$ и преобразуемую механическую энергию $W_{мех}$, отношение максимальных значений которых дает коэффициент электромеханического преобразования $K_{эмп} = \max(W_{мех}) / \max(W_{эл})$. Далее приведены количественные оценки влияния формы фазного тока на основные свойства ВИД для одной из наиболее распространенных конфигураций четырехфазного двигателя с числом полюсов 8/6.

Результаты моделирования. Как показано в работе [12], на режиме максимальной выходной мощности при заданном ограничении I_m (участок II кривой 2, см. рис. 1) величина диапазона изменения скорости и степень увеличения выходной мощности зависят от состояния магнитной системы двигателя. Наибольший диапазон имеет линейный режим, т.е. режим без насыщения. В частности, для исследуемого двигателя с типовыми параметрами при $K_\Lambda = 7$ этот диапазон составляет около 8. Выберем расчетную точку “в” в середине этого диапазона — $\omega_{раб}^* = 4$ ($\omega_{баз}$ соответствует точке “а”, см. рис. 1). На рис. 3, а показаны осциллограммы токов в этой точке при треугольной и прямоугольной формах тока, а в табл. 1 приведено сравнение показателей этих режимов относительно базового режима.

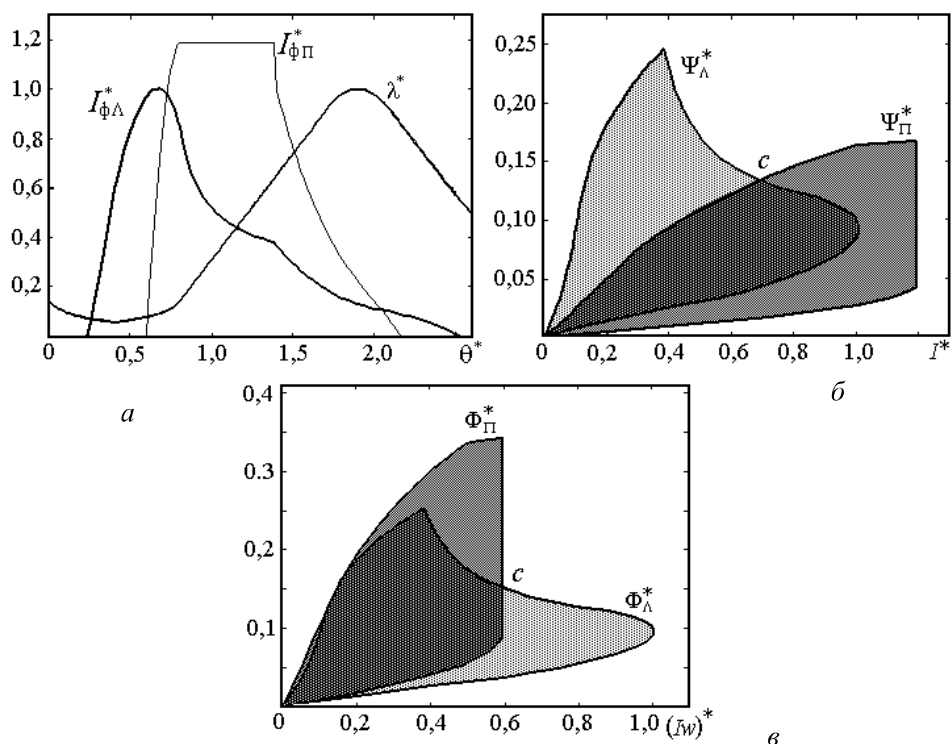


Рис. 3. Характеристики ВИД при $K_{нас} = 1, \omega_{раб}^* = 4$

Сравнение параметров исследуемых и базового режимов

Показатель	Положение точки номинального режима на механических характеристиках (рис. 1)		
	П “а”	Λ “в” (2)”	П “в” (3)”
$M_{\text{раб}}^*$	1	0,33	0,33
$\omega_{\text{раб}}^*$	1	4	4
$P_{\text{вых}}^*$	1	1,33	1,33
w^*	1	1	0,5
$I_{\text{м}}^*$	1	1	1,19
$I_{\text{д}}^*$	1	0,8	1,18
$I_{\text{ср}}^*$	1	0,89	1,19
$K_{\text{эмп}}$	0,57	0,75	0,62

Примечание: w^* — число витков; $I_{\text{м}}^*$, $I_{\text{д}}^*$, $I_{\text{ср}}^*$ — максимальное, действующее и среднее значения тока фазы.

Согласно условию (2) для перехода от треугольной к прямоугольной форме тока число витков фазы было уменьшено в 2 раза. При этом, для сохранения того же значения выходной мощности потребовалось смещение угла $\theta_{\text{вкл}}$ в сторону отставания. В результате амплитуда тока $I_{\text{м}}^*$, среднее $I_{\text{ср}}^*$ и действующее $I_{\text{д}}^*$ значения тока фазы возросли практически одинаково, почти на 20 %, однако коэффициент электромеханического преобразования энергии $K_{\text{эмп}}$ уменьшился с 0,75 до 0,62, т.е. также примерно на 20 %.

Тот факт, что для треугольной формы тока удается получить то же среднее значение момента при меньших значениях $I_{\text{м}}^*$ и $I_{\text{ср}}^*$, наглядно можно объяснить, сопоставляя годографы потокосцепления от тока $\Psi_{\Lambda}^*(I^*)$ и $\Psi_{\Pi}^*(I^*)$ (рис. 3, б). Увеличение вдвое числа витков приводит к спаданию тока на интервале $\gamma_{\text{раб}}$, делая форму тока треугольной, при соответствующем увеличении максимума потокосцепления Ψ_{Λ}^* . В результате в некоторой точке “с” годографы $\Psi_{\Lambda}^*(I^*)$ и $\Psi_{\Pi}^*(I^*)$ пересекются, и далее Ψ_{Λ}^* превышает Ψ_{Π}^* , что полностью компенсирует уменьшение тока на начальном этапе работы фазы.

Аналогичный результат можно получить из сопоставления зависимостей $\Phi_{\Lambda}^*(Iw^*)$ и $\Phi_{\Pi}^*(Iw^*)$, показанных на рис. 3, в. В данном случае траектории отключения фазы практически совпадают, но возрастание амплитуды МДС для годографа $\Phi_{\Lambda}^*(Iw^*)$ из-за удвоенного числа витков полностью компенсирует фактор возрастания тока на 20 % для годографа $\Phi_{\Pi}^*(Iw^*)$ и постоянство тока на интервале $\gamma_{\text{раб}}$. Это объясняет равенство средних значений момента ВИД за цикл коммутации

при треугольной и прямоугольной формах тока для рассматриваемого случая.

Проведенные исследования показывают, что при любых значениях $K_{\text{нас}}$ и $\omega_{\text{раб}}^*$ переход к прямоугольной форме тока приводит к росту амплитуды фазного тока. Причина — в снижении эффективности преобразования энергии в ВИД. Следовательно, для получения одинаковой мощности на выходе необходимо на определенных этапах цикла коммутации потребление большей мощности из сети. Следствием чего является необходимость увеличения установленной мощности инвертора, коммутирующего фазные обмотки ВИД, пропорционально росту амплитуды фазного тока.

Однако при комплексном проектировании привода недостаточно принимать к рассмотрению только установленную мощность инвертора. Необходимо также сопоставить обмоточные данные и потери в меди ВИД при треугольной и прямоугольной формах фазного тока.

Соотношения обмоточных данных и потерь в меди ВИД определяются как изменением числа витков и действующих значений тока фазы, которые установлены ранее, так и возможным изменением площади сечения и активного сопротивления фазной обмотки. С учетом того, что сопротивление проводника, как известно, прямо пропорционально его длине (числу витков) и обратно пропорционально площади сечения, находим, что при прямоугольной и треугольной формах тока сопротивления фазной обмотки связаны следующим образом:

$$\frac{R_{\Pi}}{R_{\Lambda}} = \frac{S_{0,\Lambda} w_{\Pi}}{S_{0,\Pi} w_{\Lambda}}, \quad (3)$$

где R_{Π} , $S_{0,\Pi}$, w_{Π} , R_{Λ} , $S_{0,\Lambda}$, w_{Λ} — активное сопротивление, площадь сечения проводника и число витков фазы двигателя с прямоугольной и треугольной формами фазного тока соответственно.

Конкретные численные соотношения между R_{Π} и R_{Λ} , $S_{0,\Pi}$ и $S_{0,\Lambda}$ находятся из уравнения (3) с учетом дополнительных ограничений. Такими ограничениями могут быть, например, требования сохранения неизменными плотности тока проводника $j_{\Pi} = j_{\Lambda}$ при изменении формы тока, либо постоянство площади окна стали $S_{0,\Pi} = S_{0,\Lambda}$ или потерь в меди $\Delta P_{\text{м},\Pi}^* = \Delta P_{\text{м},\Lambda}^*$ и т.п.

Рассмотрим подробнее соотношения между основными параметрами ВИД при постоянстве плотности тока в проводнике фазной обмотки $j_{\Pi} = j_{\Lambda}$, поскольку это условие имеет наибольшее практическое значение. Требуемое изменение сечения проводника определяется изменением действующего значения тока фазы:

$$\frac{S_{0,\Pi}}{S_{0,\Lambda}} = \frac{I_{\text{д},\Pi}}{I_{\text{д},\Lambda}}. \quad (4)$$

С учетом уравнений (4) и (3) находим соотношение сопротивлений фазных обмоток

$$\frac{R_{\Pi}}{R_{\Lambda}} = \frac{I_{д,\Lambda} \omega_{\Pi}}{I_{д,\Pi} \omega_{\Lambda}} \quad (5)$$

и потерь в меди

$$\frac{\Delta P_{м,\Pi}}{\Delta P_{м,\Lambda}} = \frac{I_{д,\Pi}^2 R_{\Pi}}{I_{д,\Lambda}^2 R_{\Lambda}} = \frac{I_{д,\Pi} \omega_{\Pi}}{I_{д,\Lambda} \omega_{\Lambda}}. \quad (6)$$

Нетрудно установить, что соотношения между объемами меди и площадями окна стали, в данном случае, совпадают с соотношением (6):

$$\frac{V_{м,\Pi}}{V_{м,\Lambda}} = \frac{S_{\Pi}}{S_{\Lambda}} = \frac{I_{д,\Pi} \omega_{\Pi}}{I_{д,\Lambda} \omega_{\Lambda}}, \quad (7)$$

где $V_{м,\Pi}$, $V_{м,\Lambda}$, S_{Π} , S_{Λ} — объемы меди и площади сечения окна стали при прямоугольной и треугольной формах фазного тока соответственно.

В табл. 2 приведено сравнение значений $S_{0,\Pi}$ и $S_{0,\Lambda}$, R_{Π} и R_{Λ} , $\Delta P_{м,\Pi}^*$ и $\Delta P_{м,\Lambda}^*$, $V_{м,\Pi}$ и $V_{м,\Lambda}$ рассматриваемых режимов работы ВИД.

Таблица 2

Сравнение основных параметров ВИД при работе на исследуемых и базовом режимах

Показатель	Положение точки номинального режима на механических характеристиках рис. 1		
	П “а”	Λ “в” (2)	П “в”(3)
j^*	1	0,8	0,8
S_0^*	1	1	1,475
R^*	1	1	0,339
ΔP_M^*	1	0,64	0,472
ΔV_M^*	1	1	0,738

Примечание: j^* — плотность тока в проводнике фазы; S_0^* — сечение проводника; R^* — сопротивление фазы; ΔP_M^* , ΔV_M^* — потери в меди и объем меди.

Как видно из табл. 2, при переходе ко второму варианту исполнения ВИД увеличение сечения проводника S_0^* пропорционально изменению действующего значения тока фазы I_d^* ($\sim 20\%$) при уменьшении вдвое числа витков ведет к снижению сопротивления фазы ВИД R^* почти в 2,4 раза. В результате, несмотря на 20 %-ный рост действующего значения тока фазы, потери в меди уменьшаются примерно на 8,5 %. При этом объем меди уменьшается примерно на 30 %.

Таким образом, выбор расчетного (номинального) режима работы ВИД на нелинейном участке механической характеристики при треугольной форме фазного тока ведет к снижению амплитуды фазного то-

ка и, соответственно, уменьшению установленной мощности инвертора. Причина этого в повышении эффективности электромеханического преобразования энергии ВИД при треугольной форме тока. Однако это требует увеличения числа витков фазной обмотки, что, например, при постоянстве плотности тока в проводниках обмотки ведет к увеличению потерь в меди и объема меди.

Необходимо также помнить о том, что из-за более раннего включения фазы при треугольной форме фазного тока в номинальном режиме работы уменьшается диапазон возможного увеличения $\gamma_{\text{вкл}}$ относительно этого режима, что соответствующим образом сказывается на регулировочных возможностях ВИД. Проведенный анализ позволяет обоснованно выбирать форму тока для номинального режима работы проектируемого ВИД с учетом всего комплекса требований, предъявляемых к электроприводу.

Выводы. 1. При проектировании ВИД заданная выходная мощность и скорость могут быть обеспечены при неизменной магнитной геометрии и напряжении питания, но различном числе витков и параметрах коммутации двигателя. Это дает возможность выбирать рациональную форму фазного тока расчетного (номинального) режима работы ВИД с учетом дополнительных требований к электроприводу.

2. Количественные соотношения между основными показателями ВИД при различных формах фазного тока зависят от дополнительных условий сопоставления, например, сохранения неизменной плотности тока и т.п.

3. Для наиболее реальных условий сопоставления — при постоянстве плотности тока в проводниках и отсутствии ограничений на установленную мощность инвертора — прямоугольная форма фазного тока предпочтительнее треугольной, так как ведет к снижению потерь мощности в обмотках и их объема.

4. При тех же условиях наилучшие показатели по эффективности преобразования энергии, по снижению установленной мощности инвертора и обеспечению перегрузочной способности привода, по моменту без завышения установленной мощности инвертора на номинальном режиме имеет ВИД с треугольной формой фазного тока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. К о п ы л о в И. П., К л о к о в Б. К., М о р о з к и н В. П., Т о к а р е в Б. Ф. Проектирование электрических машин / Под ред. И.П. Копылова. В 2-х кн. Кн. 1. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 463 с.
2. M i l l e r T. J. E. Switched Reluctance Motors and Their Control. – Oxford: Magna Physics Publishing and Clarendon Press, 1993. – 205 с.

3. Бычков М. Г. Элементы теории вентильно-индукторного электропривода // Электричество. – 1997. – № 8. – С. 35–44.
4. Stephenson J. M., El-Khazendar M. A. Saturation in doubly salient reluctance motors // IEE PROCEEDINGS, Vol. 136, Pt. B, No. 1, January 1989.
5. Красовский А. Б., Бычков М. Г. Исследование пульсаций момента в вентильно-индукторном электроприводе // Электричество. – 2001. – № 10. – С. 33–44.
6. Бычков М. Г., Кисельникова А. В., Семенчук В. А. Экспериментальные исследования шума и вибраций в вентильно-индукторном электроприводе // Электричество. – 1997. – № 12. С. 41–46.
7. Красовский А. Б. Анализ условий формирования постоянства выходной мощности в вентильно-индукторном электроприводе // Электричество. – 2002. – № 2. – С. 36–46.
8. Бычков М. Г. Оптимизация режимов вентильно-индукторного электропривода средствами управления // Вестник МЭИ. – 1998. – № 3. – С. 73–81.
9. Бычков М. Г. Анализ вентильно-индукторного электропривода с учетом локального насыщения магнитной системы // Электричество. – 1998. – № 6. – С. 50–53.
10. Lawrenson P. J. Brief Status Review of Switched Reluctance Drives // EPE Journal Vol. 2, no 3, October 1992.
11. Красовский А. Б. Получение максимальной выходной мощности вентильно-индукторного электропривода средствами управления // Электричество. – 2002. – № 9. – С. 29–36.
12. Красовский А. Б. Применение имитационного моделирования для исследования вентильно-индукторного электропривода // Электричество. – 2003. – № 3. – С. 35–45.
13. Красовский А. Б. Базовая имитационная модель вентильно-индукторного электропривода // Системы управления и информационные технологии. – 2004. – № 3. – С. 13–17.

Статья поступила в редакцию 27.09.2004

Александр Борисович Красовский родился в 1954 г., окончил в 1977 г. Московский энергетический институт (МЭИ). Д-р техн. наук, профессор кафедры “Электротехника и промышленная электроника” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор около 60 научных работ в области дискретного электропривода.

A.B. Krasovsky (b. 1954) graduated from the Moscow Institute for Power Engineering in 1977. Ph. D. (Eng.), professor of “Electrical Engineering and Industrial Electronics” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 60 publications, in the field of discrete electric drive.



Михаил Григорьевич Бычков родился в 1949 г., окончил в 1973 г. Московский энергетический институт (МЭИ). Д-р техн. наук, профессор кафедры автоматизированного электропривода МЭИ. Автор около 70 научных работ в области электропривода и систем управления.

M.G. Bychkov (b. 1949) graduated from the Moscow Institute for Power Engineering in 1973. Ph. D. (Eng.), professor of "Electrical Engineering and Industrial Electronics" department of the Moscow Institute for Power Engineering. Author of more than 70 publications, in the field of electric drive and control systems.

