

УДК 621-075.8

А. П. Темирёв, Нгуен Куанг Кхоа  
Южно-Российский государственный политехнический  
университет им. М. И. Платова

## Исследование вентильно-индукторного двигателя большой мощности двухпакетной конструкции для пульповых насосов ГРАТ-1800/67 горнорудного оборудования

*Исследован вентильно-индукторный двигатель большой мощности 750 кВт двухпакетной конструкции (ВИД-750) для пульповых насосов ГРАТ-1800/67 горнорудного оборудования. Приведено моделирование ВИД-750 в составе насоса ГРАТ-1800/67 для режима одноимпульсной коммутации. Приведены зависимости основных показателей ВИД-750 от коммутирующих параметров и на их основе созданы траектории управляющих параметров, которые позволят реализовать заданные механические характеристики и обеспечить качество работы ВИД-750 в различных режимах. Проведено экспериментальное исследование различных режимов работы ВИД-750 для проверки функционирования и качества управления при подобранных коммутирующих параметрах.*

### Вентильно-индукторный двигатель (ВИД), вентильно-индукторный электропривод (ВИП), электропривод, вентильная индукторная машина большой мощности (ВИМ БМ), пульповый насос

В настоящее время появилась тенденция применения вентильно-индукторных приводов (ВИП БМ) вместо классических электрических электроприводов, основанных на базе асинхронных, синхронных машин и машин постоянного тока, в том числе регулируемых и нерегулируемых электроприводов в различных областях, особенно в горнодобывающей промышленности. Это объясняется хорошими удельными показателями вентильно-индукторных машин (ВИМ), недорогой технологией их производства, конструктивной простотой и надежностью. При этом считаем, что электрические машины в диапазоне мощностей более 500 кВт относятся к категории большой мощности [1].

В Новочеркасском ИРИС активно ведутся работы по применению ВИМ БМ для различного назначения. Спроектированы и испытаны вентильно-индукторные электроприводы по заданию АК «АЛРОСА» для обогатительной фабрики № 12 Удачинского ГОКа, в том числе ВИП 1600 кВт, ВИП 1250 кВт для мельниц мокрого самоизмельчения, ВИП-600 кВт для компрессорных установок и ВИП 750 кВт для пульповых насосов ГРАТ-1800/67 [2]. Объект исследования в статье – ВИП-750 кВт, предназначенный для замены асинхронных двигателей (АД) ДАЗО-1000-6-750

для пульповых насосов ГРАТ-1800/67, обеспечивающий требования по улучшению качества регулирования и пусковых характеристик, повышенной надежности и экономии электроэнергии [2].

**Моделирование ВИП-750 для пульпового насоса ГРАТ 1800/67 при одноимпульсном режиме.** При больших мощностях применение DC/DC-преобразователя в силовом канале для стабилизации напряжения питания коммутатора фаз становится нерациональным по массогабаритным и энергетическим показателям [3]. В этом случае одноимпульсное управление наиболее рационально. Его основным достоинством является то, что электрические потери в транзисторных ключах много меньше, поскольку в них отсутствует высокочастотная ШИМ-коммутация [1]. При одноимпульсном режиме регулирование момента осуществляется изменением угла включения и длительности положительного импульса напряжения при неизменном напряжении. На рис. 1 (пример отсчета углов управления для двигательного режима работы ВИД) показана привязка коммутационных параметров к импульсу тока фазы (где  $\alpha_{\text{вкл}}$  – включение двух ключей,  $\alpha_{\text{откл1}}$  – отключение одного ключа,  $\alpha_{\text{откл2}}$  – отключение второго ключа,

и связанных с ними интервалов работы фазы:  
 $+\gamma_{\text{раб}} = \alpha_{\text{откл}2} - \alpha_{\text{вкл}}$  – длительность положительного импульса  $U_{\text{ф}}$  или работы фазы;  
 $+\gamma_{\text{зак}} = \alpha_{\text{откл}2} - \alpha_{\text{откл}1}$  – длительность интервала  $U_{\text{ф}} = 0$  при  $i_{\text{ф}} > 0$  или закороченного состояния фазы;  
 $+\gamma_{\text{рег}} \equiv \gamma_{\text{раб}}$  – длительность отрицательного импульса  $U_{\text{ф}}$  или регенерации электрической энергии пока  $i_{\text{ф}} > 0$ ;  
 $+\gamma_{\text{п}}$  – длительность интервала безтоковой паузы ( $U_{\text{ф}} = 0, i_{\text{ф}} = 0$ ). Если единица измерения – электрический градус ( $1^\circ \text{эл.} = 55.6 \text{ мкс}$ ), то  $+\gamma_{\text{п}} = 360 - (\gamma_{\text{раб}} + \gamma_{\text{зак}} + \gamma_{\text{рег}})$ .

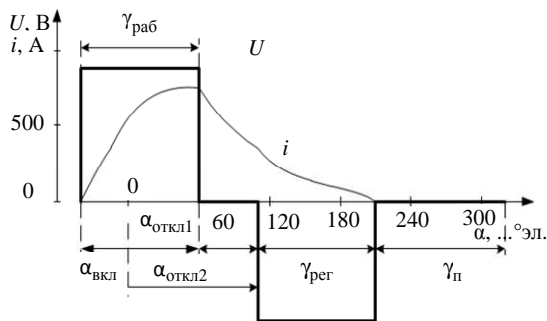


Рис. 1

Функциональная схема компьютерной модели системы одноимпульсного управления ВИП БМ представлена на рис. 2. В системе одноимпульсного управления ВИП БМ входное напряжение в инверторах не регулируется, а выход регулятора скорости воздействует на вектор-столбец углов управления силовыми ключами инвертора  $\alpha_{\text{ком}}$ .

Законы изменения углов управления задаются с помощью таблицы управления. Для унификации системы управления ВИП БМ двигателями с разными значениями номинальной частоты вращения в ней используются относительные величины  $\omega/\omega_{\text{max}}$ , где  $\omega_{\text{max}}$  – максимальная частота вращения конкретного экземпляра привода. При задании  $\omega_{\text{max}} > \omega_{\text{норм}}$  частота вращения может регулироваться как ниже, так и выше номинальной.

В алгоритме одноимпульсного управления блок коммутации управляет силовыми ключами инвертора, сравнивая заданные значения  $\alpha_{\text{ком}}$  с текущим значением угла поворота ротора  $\alpha$ . Импульсный датчик положения ротора ДПР выдает квантованное по уровню значение  $\alpha$ , которое при низкой разрешающей способности ДПР, встроенного в конструкцию ВИД, не может непосредственно использоваться в блоке коммутации. Специальный блок оценки электрического положения и скорости, реализованный программно в микропроцессорной системе управления ВИП БМ, восстанавливает сигнал текущего значения угла поворота  $\alpha$ , а также вычисляет оценку текущего значения частоты вращения  $\omega$ . Но этот блок не может вычислять достоверных оценок  $\alpha$  и  $\omega$  при вращении с частотами меньше некоторого минимального значения  $\omega_{\text{min}}$ . Поэтому при работе на низких частотах, фазы коммутируются непосредственно по сигналам ДПР. Для реализации этого режима в компьютерной модели рассматриваем переключение сигналов управления

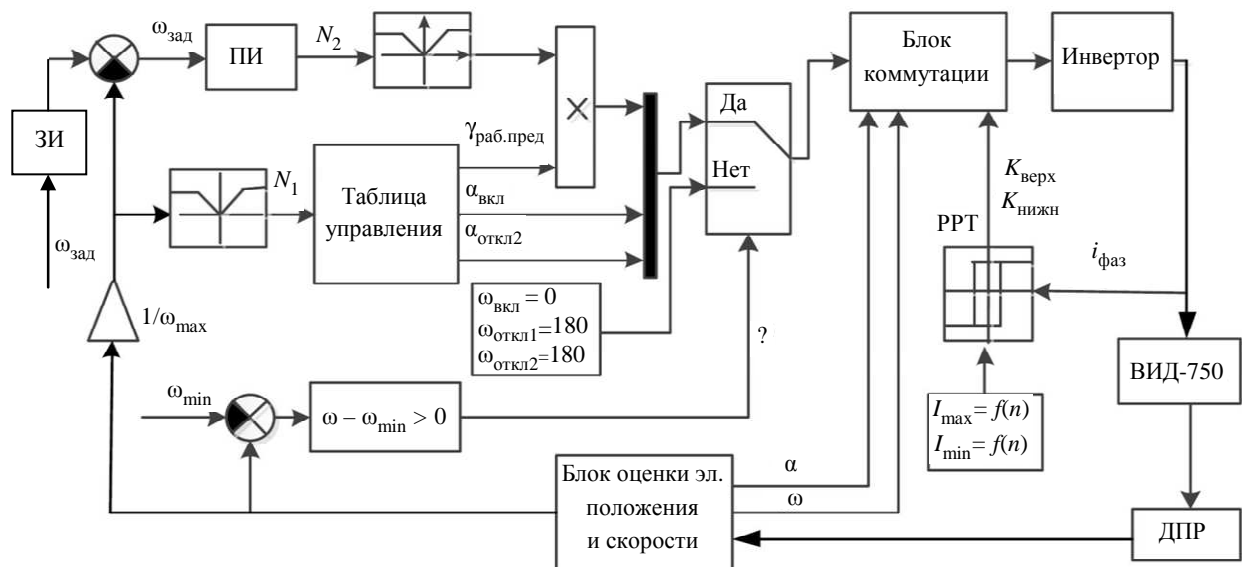


Рис. 2

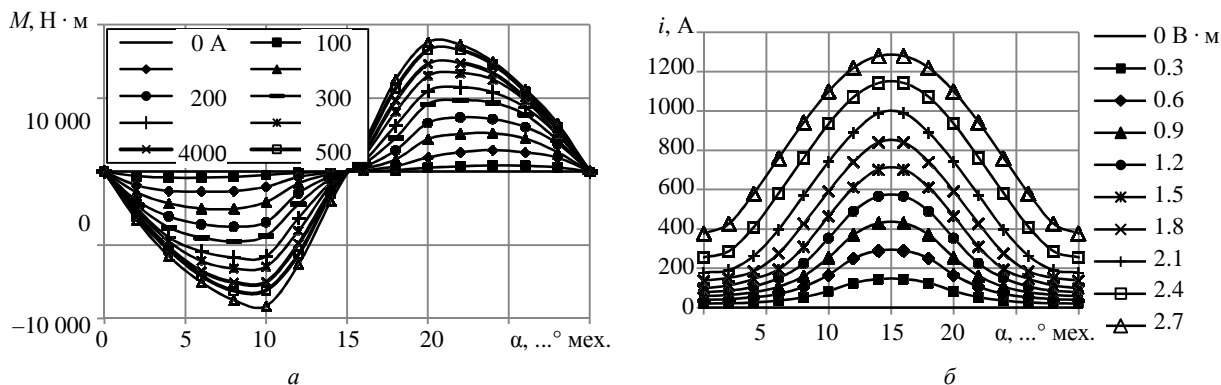


Рис. 3

на входе блока коммутации в функции разности  $\omega - \omega_{\min}$ . Начальное значение углов  $\alpha_{\text{вкл}} = 0$ ,  $\gamma_{\text{раб}} = 180^\circ$ ,  $\gamma_{\text{зак}} = 0$  наиболее просто реализуется при управлении непосредственно от сигналов датчика положения ротора и не требует знания текущего значения скорости и каких-либо дополнительных вычислений, в том числе и обращения к таблице управления. При таких углах фаза включается в полностью рассогласованном положении и отключается в согласованном. На низких скоростях значение момента определяется заданной уставкой токоограничения  $I_{\max}(\omega)$  на входе релейного регулятора тока РРТ, при достижении  $I_{\max}(\omega)$  верхний ключ  $K_{\text{верх}}$  отключается и при достижении заданного  $I_{\min}(i)$  нижний ключ отключается. С целью обеспечения универсальности алгоритма управления вводятся относительные величины  $\omega_{\text{зад}}/\omega_{\max}$  и  $\omega/\omega_{\max}$ . Предлагается разделить функции управления углами или ввести два управляющих параметра  $N_1$  и  $N_2$ .  $N_1$  по-прежнему считать относительным значением скорости и с его помощью определять по таблице значение  $\alpha_{\text{вкл}} = f_1(N_1)$ . Второй управляющий параметр  $N_2 = M_{\text{зад}}/M_{\text{пред}}$  ( $M_{\text{зад}}$  – заданное значение момента;  $M_{\text{пред}}$  – предельное значение момента), используется для изменения  $\alpha_{\text{раб}}$  при текущем значении  $N_1$ . Вначале из таблицы управления  $\alpha_{\text{раб. пред}} = f_2(N_1)$  получаем предельное значение  $\alpha_{\text{раб}}$ , обеспечивающее получение для текущего значения скорости максимального требуемого момента. Далее для получения текущего значения интервала работы используется формула  $\alpha_{\text{раб}} = \alpha_{\text{раб. пред}} N_2$ . При этом предполагается, что значение момента двигателя  $M$  прямо пропорци-

онально длительности импульса  $\alpha_{\text{раб}}$ . Это допущение позволяет существенно упростить алгоритм управления и его практическую реализацию. При  $\omega < \omega_{\text{зад}}$  имеем ограничение выхода регулятора скорости  $N_2 = 1$  и получаем характеристику максимального момента  $M_{\text{пред}}(\omega)$  и если момент нагрузки  $M_c$  меньше  $M_{\text{пред}}$ , то будет происходить разгон до любой заданной скорости, при достижении которой регулятор скорости уменьшит значение  $N_2$ , что обеспечит равенство  $M(\alpha_{\text{вкл}}, \alpha_{\text{раб}} < \alpha_{\text{раб. пред}}) = M_c$ . При  $\omega > \omega_{\text{зад}}$  имеем ограничение  $N_2 = 0$  и торможение двигателя происходит под действием момента нагрузки  $M_c$ . В данной работе рассматривается вариант привода для работы только в двигательном режиме (без электрического торможения, что характерно для насосных механизмов).

Математическая модель ВИД-750 построена на основе методики, описанной в [4], [5]. Однако структурная схема системы одноимпульсного управления ВИД-750 в рабочем режиме существенно отличается от схемы, приведенной в [4]. В программе Elcut выполнен ряд расчетов магнитных полей ВИД-750 [6]. Зависимость вращающего момента  $M$  от угла поворота ротора  $\alpha$  при разных значениях тока фазы  $i$  показана на рис. 3, а. Расчетная зависимость потоко сцепления  $\psi(\alpha, i)$  преобразована методом интерполяции к виду  $i(\alpha, \psi)$ , показанному на рис. 3, б. За нулевое положение принято положение, когда зубец ротора находится против полюса статора (согласованное положение).

Компьютерная модель системы одноимпульсного управления ВИП БМ при совместной работе обоих пакетов в одинаковом режиме работы ВИП БМ показана на рис. 4. Ее основу составляют блоки «ВИД» и «ИНВЕРТОР», аналогичные рассмотренным в [4], [5], [7]. Блок двухмерной таб-

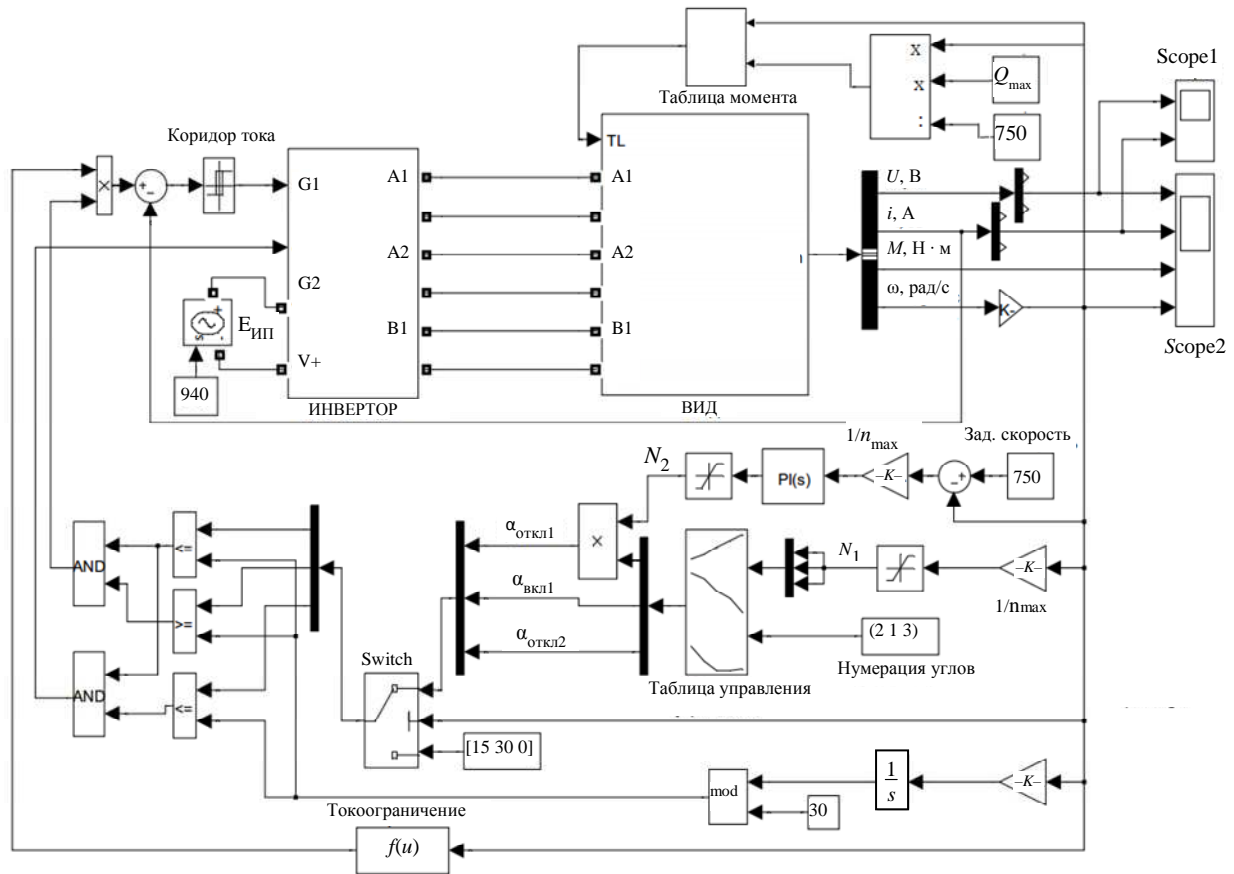


Рис. 4

лицы «Таблица момента» содержит зависимость момента от расхода насоса при различных скоростях и задает нагрузку к двигателю через вход TL.

Эти зависимости были получены при моделировании режимов ГРАТ 1800/67. Функциональный блок  $f(u)$  на входе регулятора тока задает зависимость от скорости уровня токоограничения. В одноимпульсном режиме кривая токоограничения проходит выше рабочих значений тока и используется для предотвращения аварийных ситуаций.

На элементах сравнения и логических элементах AND сформированы условия включения верхнего и нижнего транзисторов полумоста инвертора сигналами G1 и G2.

Дополнительное условие для G1 формируется релейным элементом в функции разности ( $I_{огр} - i$ ). Обратим внимание на то, что схема на рис. 2 представлена в однолинейном виде, но большинство сигналов – трехканальные (по числу фаз инвертора), и их обработка производится параллельно и независимо по каждому каналу. Адекватность математической модели ВИП БМ проверена в [8] для режима двигателя-генератора.

В диапазоне частоты вращения 75...750 об./мин с использованием разработанных компьютерных моделей произведен ряд расчетов ВИД-750 в двигательном режиме. В этом режиме угол включе-

ния  $\alpha_{вкл}$  изменялся в диапазоне от  $-60^\circ$  до  $40^\circ$ , ширина импульса  $\gamma_{раб}$  в диапазоне от 40 до  $100^\circ$ , окончательная пауза  $\gamma_{зак}$  принималась равной  $20^\circ$ . В качестве примера на рис. 5 приведены зависимости  $M$ , КПД и коэффициента пульсации момента  $\Delta_M$  от  $\alpha_{вкл}$  при разных  $\gamma_{раб}$  в двигательном режиме и  $n = 500$  об./мин.

Анализ результатов показывает, что для каждого значения  $\gamma_{раб}$  существует оптимальное значение  $\alpha_{вкл}$ , обеспечивающее максимальное значение момента. Для роста его значения требуется как увеличение  $\gamma_{раб}$ , так и смещение  $\alpha_{вкл}$  в сторону опережения. На рис. 5 показаны результаты расчета момента (а), пульсация момента (б) и КПД ВИП-750 при 500 об./мин. Графики  $M(\alpha_{вкл})$  в районе максимума достаточно пологие и попадают на близкие к максимальным значениям КПД (рис. 5, б). Увеличение частоты вращения при неизменных углах управления снижает значение момента. Для восстановления его значения в районе оптимума требуется согласованное изменение  $\alpha_{вкл}$  и  $\gamma_{раб}$ . Анализ графиков коэффициента пульсации момента  $\Delta_M \% (\alpha_{вкл})$  приводит

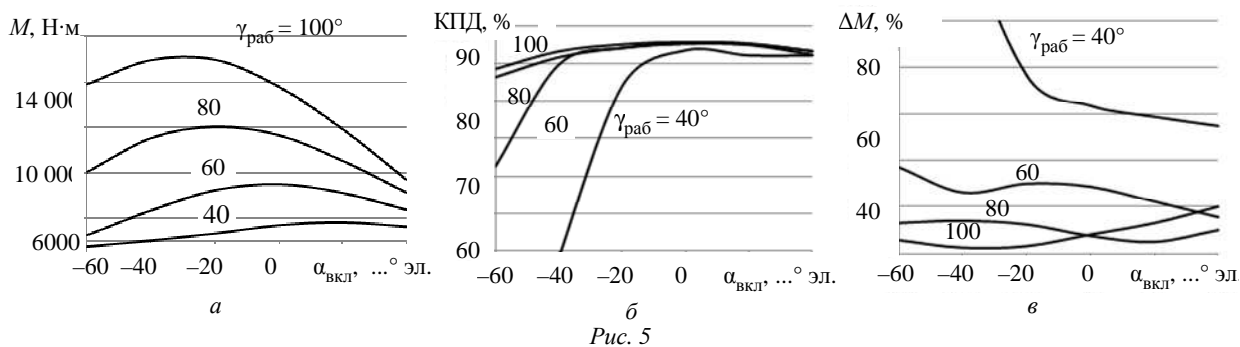


Рис. 5

к выводу, что только при достаточно длительном интервале работы ( $\gamma_{\text{раб}} = 80 \dots 100^\circ$ ) имеет смысл говорить о минимуме пульсаций момента, но при этом значения  $\Delta M$  достаточно малы в широком диапазоне изменения  $\alpha_{\text{вкл}}$ . При меньших значениях  $\gamma_{\text{раб}}$  пульсации возрастают и их значение невозможно уменьшить. Это объясняется самим принципом одноимпульсного управления и может быть улучшено только переходом к каким-либо способам модуляции импульса напряжения фазы высокой частотой.

Установлено, что для каждого режима работы ВИМ существуют оптимальные параметры коммутации, при которых процесс электрохимического преобразования энергии протекает наиболее эффективно. При этом также установлено, что одновременно обеспечиваются и другие важные показатели качества электропривода – максимальный КПД двигателя и максимум вращающего момента ВИМ [1]. Приведенные зависимости являются основой для получения оптимальных управляющих параметров, которые позволяют реализовать в системе ВИП-ГРАТ 1800/67 желаемые механические характеристики.

На рис. 6 приведены траектории управления углами коммутации ВИД-750 в рабочем режиме, реализующие желаемую механическую характеристику (с увеличенным пусковым моментом).

**Методика экспериментального определения энергетических показателей ВИП БМ при одноимпульсном режиме.** Рассмотрим методику экспериментального определения кривой перемагничивания для оценки потерь в стали и энергетических показателей рабочих режимов ВИП. Методика может быть использована для оценок вращающего момента на валу двигателя, потери в стали, его входной и выходной мощности, коэффициента полезного действия (КПД) и коэффициента электрохимического преобразования энергии ( $K_{\text{ЭМП}}$ ) – аналога коэффициента мощности для ВИП [8].

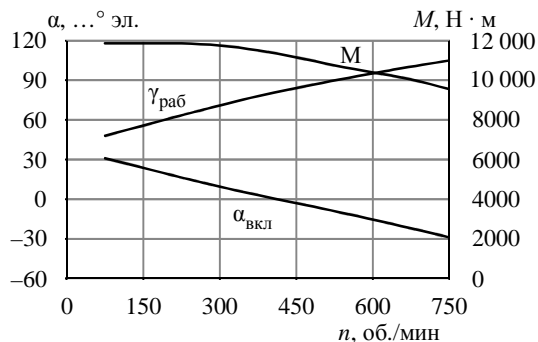


Рис. 6

В каждом режиме работы ВИД существуют оптимальные параметры управления (углы коммутации фаз), при которых процесс электрохимического преобразования энергии протекает наиболее эффективно [1]. Поэтому процесс испытания ВИП сопровождается корректировкой параметров углов коммутации, близких к оптимальным. В дальнейшем проведены исследования различных режимов работы ВИП-750 для оценки качества его работы на основе подобранных управляющих параметров. При этом рассматриваются энергетические показатели в режимах, изменении частоты и нагрузки, соответствующих регулированию насоса частотой и задвижкой.

На рис. 7, а представлены формы тока трех фаз  $i_A, i_B, i_C$  (одного пакета) и их суммы  $i_{\text{сум}} \text{DC}$  (значение тока звена постоянного тока) ВИД-750 при скорости 750 об./мин, мощности  $P_2 = 428 \text{ кВт}$  и углах управления, выбранных опытным путем  $\alpha_{\text{вкл}} = 0^\circ, \alpha_{\text{раб}} = 125^\circ, \alpha_{\text{зак}} = 20^\circ$ . При этом КПД = 92.5 % и 30 %-я электроэнергия циркулирует между фазами. На рис. 7, б показана работа ВИП-750 при номинальном режиме, скорости 750 об./мин,  $P_2 = 750 \text{ кВт}$  и углах управления, выбранных расчетным путем  $\alpha_{\text{вкл}} = -29^\circ, \alpha_{\text{раб}} = 105^\circ, \alpha_{\text{зак}} = 58^\circ$  при этом  $K_{\text{эл. мех}} = 0.83, \text{КПД} = 94 \%$  и 15 %-я  $W_{\text{эл}}$  циркулирует между

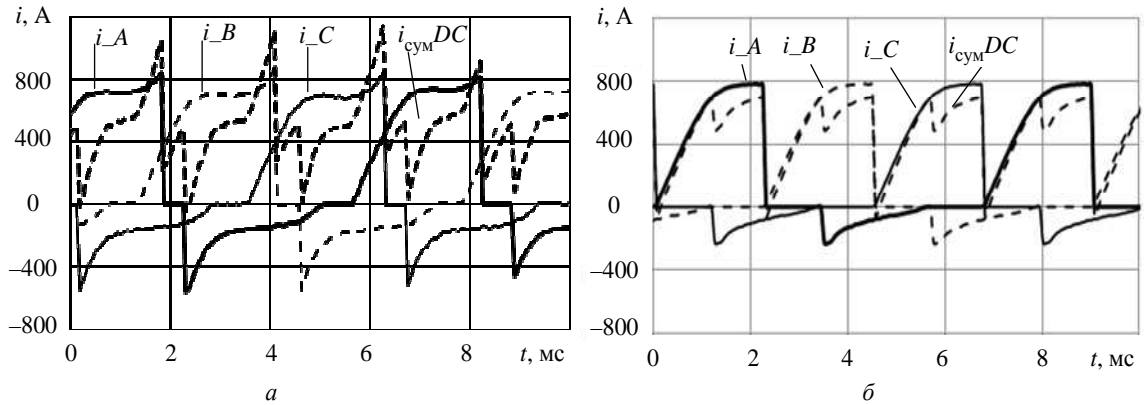


Рис. 7

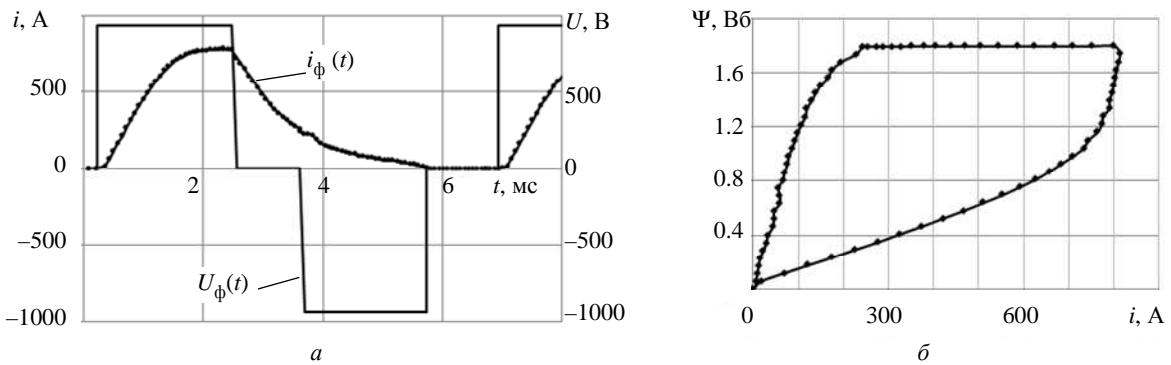


Рис. 8

фазами. Это показывает, что правильный подбор углов коммутации улучшает энергетические показатели. В обоих случаях  $I_{DC}$  практически не имеет участков отрицательных значений. Ток на участке отключения не возвращается в конденсатор звена постоянного тока, а потребляется следующей включаемой фазой. Это опровергает утверждение о том, что ВИП требует повышенных значений емкости фильтра ЗПТ из-за большой реактивной составляющей фазного тока. Тем не менее, переменная составляющая в  $i_{сум DC}$  значительная и имеет моменты больших скачков тока. Поэтому выбор значения  $C_{DC}$  и его распределения по конструкции силового преобразователя требует специального рассмотрения.

На рис. 8, а приведены осциллограммы напряжения и тока при номинальном режиме и на рис. 8, б приведен цикл коммутации фазы  $\Psi(i)$ .

Методика обработки экспериментальных данных рассмотрена на примере обработки осциллограмм рабочего цикла коммутации фазы при  $n = 750 \text{ мин}^{-1}$  ВИП 750. Исходные осциллограммы напряжения  $u_{\phi}(t)$  и тока фазы  $i_{\phi}(t)$  приведены на рис. 7, а. Интегрированием экспериментальных значений напряжения фазы получаем зависимость потокосцепления по следующей формуле:

$$\Psi(t) = \Psi_0 + \int_{t_0}^t U_{\phi} dt,$$

по которой затем строим график зависимости  $\Psi(i_{\phi}, t)$  (рис. 8, б).

Длительность интервала протекания тока еще не приближается к  $360^\circ$  и имеется большая длительность расфорсировки, на цикле коммутации фазы участок расфорсировки показан горизонтальным. Поэтому при существующих параметрах машины, напряжения постоянного звена и алгоритме изменения углов коммутации существует резерв увеличения выходной мощности на скорости  $n = 750 \text{ об./мин}$ . Увеличение угла включения на сторону опережения или уменьшения длительности расфорсировки приводят к увеличению потокосцепления и момента двигателя.

График мгновенной электрической мощности (рис. 9 – расчетные осциллограммы электрической мощности  $P_{эл}(t)$  и энергии  $W_{эл}(t)$  для рабочего цикла коммутации фазы при  $n = 750 \text{ мин}^{-1}$ ), потребляемой фазой напряжения из звена постоянного тока, рассчитывается по следующей формуле:

$$P_{эл}(t) = u_{\phi}(t) i_{\phi}(t),$$

а электрической энергии в пределах всего цикла коммутации фазы по формуле

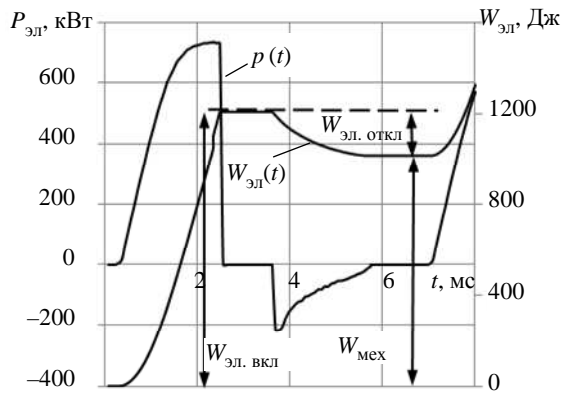


Рис. 9

$$W_{эл}(t) = \int_{t_{вкл}}^t (u_{ф} i_{ф}) dt = \int_{t_{вкл}}^t P_{эл}(t) dt.$$

Расчет среднего значения  $P_{эл}(t)$  на периоде коммутации  $T_{ком} = 6.67$  мс дает значение  $P_{эл.цикл} = 130$  кВт, а его умножение на  $T_{ком}$  дает значение энергии, преобразуемой в механическую работу (без учета электрических потерь в обмотке и потерь в стали):

$$\begin{aligned} W_{мех}(t) &= \int_{t_{вкл}}^{t_{вкл}+T_{ком}} P_{эл}(t) dt = \\ &= P_{эл.цикл} T_{ком} = 0.87 \text{ кДж}. \end{aligned}$$

Чтобы определить электрические потери, рассчитываем по графику  $i_{ф}^2(t)$  на интервале  $T_{ком}$  действующее значение тока фазы  $I_{п.ф} = 416$  А и при  $R_{ф} = 0.0075$  Ом мощность электрических потерь фазы  $\Delta P_{эл} = I_{п.ф}^2 R_{п.ф} = 1.29$  кВт.

Мощность потерь в стали приближенно оцениваем по графику  $\Delta W_{ст}(\Psi_{max})$  (рис. 10 – зависимости потерь энергии в цикле перемагничивания  $\Delta W_{ст}(\Psi_{max})$ , энергии  $W_{вкл}$ , потребляемой при включении, и энергии  $W_{откл}$ , возвращаемой при отключении фазы) в согласованном положении зубцов статора и ротора, при этом потери энергии в цикле перемагничивания  $\Delta W_{ст}$ , получаемые как разность энергии  $W_{вкл}$ , потребляемой при включении, и энергии  $W_{откл}$ , возвращаемой при отключении фазы.

Из рис. 10 для рассматриваемого цикла коммутации  $\Psi_{max} = 1.8$  Вб, что дает  $\Delta W_{ст} = 15.7$  Дж. Этому соответствует мощность потерь в стали  $\Delta P_{ст} = \Delta W_{ст} / T_{ком} = 2.4$  кВт.

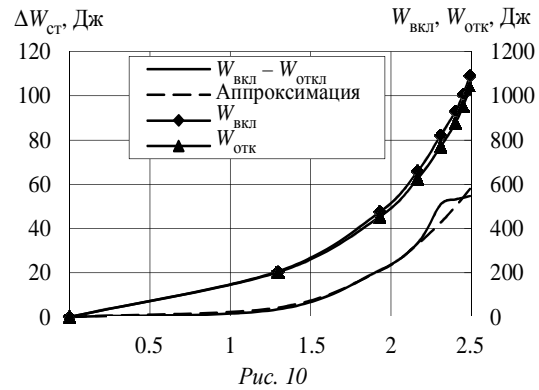


Рис. 10

В результате имеем механическую мощность, развиваемую одной фазой преобразователя (без учета механических потерь)  $P_{мех.п.ф} = P_{эл.цикл} - \Delta P_{эл} - \Delta P_{ст} = 125.8$  кВт.

При условии равномерности распределения нагрузки между фазами преобразователя и идентичности работы всех трех фаз в каждом из двух пакетов имеем суммарную электрическую мощность и суммарную механическую мощность:

$$\begin{aligned} P_{эл} &= 6P_{эл.цикл} = 6 \cdot 130 = 780 \text{ кВт}, \\ P_{мех} &= 6P_{мех.п.ф} = 6 \cdot 125.8 = 754.8 \text{ кВт}, \\ КПД &= P_{мех} / P_{эл} \cdot 100 = 96.7 \%. \end{aligned}$$

Из графика  $W_{эл}(t)$  (рис. 9) по [9] определяем значение коэффициента электромеханического преобразования  $K_{ЭМП} = W_{мех} / W_{эл.вкл} = 1.0 / 1.2 = 0.83$ . Значение вращающего момента на валу находим по формуле  $M = P_{мех} / \omega = 9.6$  кН·м.

**Исследование рабочих режимов ВИМ БМ при одноимпульсном управлении.** В каждом режиме работы ВИД существуют оптимальные параметры управления (углы коммутации фаз), при которых процесс электромеханического преобразования энергии протекает наиболее эффективно [1]. Поэтому процесс испытания ВИП сопровождается корректировкой параметров углов коммутации, близкими к оптимальным. Далее проведены исследования различных режимов работы ВИП-750 для оценки качества его работы на основе подобранных управляющих параметров. При этом рассматриваются энергетические показатели в режимах изменения частоты и нагрузки, соответствующих способам регулирования насоса частотой и задвижкой.

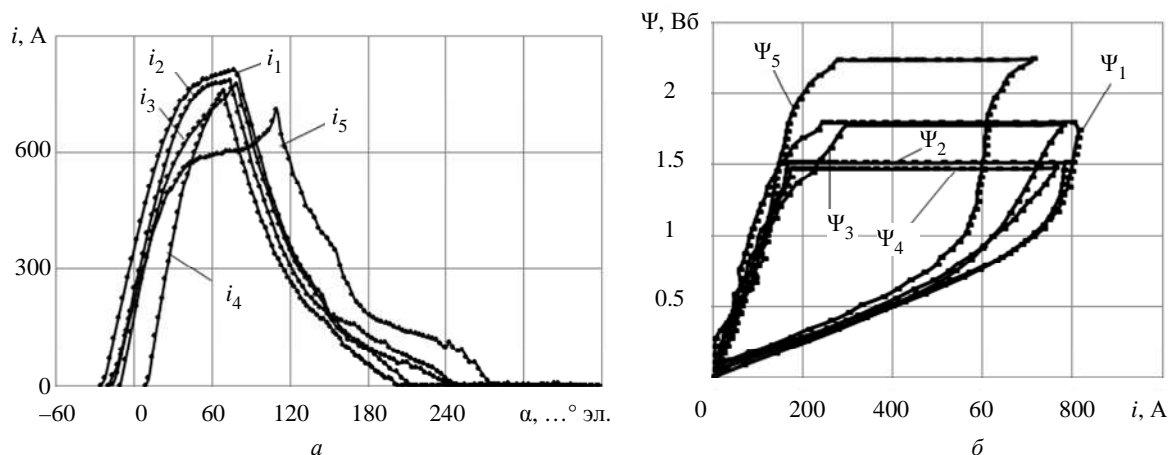


Рис. 11

На рис. 11, *а* показаны формы тока ВИП-750 при разных режимах работы, при этом  $i_1, i_2, i_3, i_4$  имеют углы коммутации, определенные по таблице коммутации, построенной на основе полученных результатов моделирования, углы управления  $\alpha_{оп}$  выбраны опытным путем. Аналогично получены результаты для линий потокосцепления, показанные на рис. 11, *б*. Форма тока  $i_1$  получена при номинальном режиме  $\alpha_{вкл} = -28^\circ$ ,  $\alpha_{раб} = 105^\circ$  и  $\alpha_{п} = 58^\circ$ , мощности 750 кВт и скорости 750 об./мин. Форма тока  $i_2$  получена при  $\alpha_{вкл} = -20^\circ$ ,  $\alpha_{раб} = 93^\circ$ , мощности 600 кВт и скорости 750 об./мин.

Форма тока  $i_3$  получена при  $\alpha_{вкл} = -8^\circ$ ,  $\alpha_{раб} = 90^\circ$  и  $\alpha_{п} = 56^\circ$  мощности 560 кВт и скорости 640 об./мин. Форма тока  $i_4$  получена при  $\alpha_{вкл} = 8.5^\circ$ ,  $\alpha_{раб} = 84.5^\circ$  и  $\alpha_{п} = 53^\circ$ , мощности 429 кВт и скорости 560 об./мин. Форма тока  $i_{оп}$  получена при  $\alpha_{вкл} = -10^\circ$ ,  $\alpha_{раб} = 111^\circ$  и  $\alpha_{п} = 51^\circ$ , мощности 542 кВт и скорости 740 об./мин. Токи  $i_1, i_2, i_3, i_4$  на рис. 11, *а* и потокосцепление  $\Psi_1, \Psi_2, \Psi_3$  на рис. 11, *б* приобретают почти одинаковые формы. Проведенный анализ тока  $i_1$  показал, что его форма близка к оптимальной, поэтому можно утверждать, что форма токов  $i_2, i_3, i_4$  также близка к оптимальным значениям. А работа ВИД-750 – ГРАТ

1800/67 в широком диапазоне регулирования насоса ГРАТ 1800/67 обеспечивает хорошие динамические характеристики.

Анализ тока  $i_{оп}$  показывает, что сначала ток остановился в пределах 600 А, а потом быстро поднялся – это вызывает быстрое увеличение потокосцепления (рис. 11, *б*), уровней шума и вибрации двигателя соответственно, поэтому для уменьшения этих нежелательных эффектов необходимо быстрее отключить верхний ключ, чтобы перейти в медленную расфорсировку.

Для ВИП БМ вариант одноимпульсного управления рационален, его основным достоинством – то, что электрические потери в транзисторных ключах много меньше, чем в других схемах управления, поскольку в них отсутствует высокочастотная ШИМ-коммутация. Самой сложной задачей при таком управлении ВИП БМ является определение траекторий коммутирующих параметров, зависящих от нагрузочных характеристик исполнительных устройств и обеспечивающих хорошее качество работы ВИП в различных требуемых режимах.

Насосные агрегаты ГРАТ-1800/67 с использованием ВИД-750 потребляют на 150...200 кВт/ч меньше, чем насосы, работающие от обычного привода с нерегулируемым по оборотам асинхронным электродвигателем от сети. Пусковые характеристики насоса с ВИД-750 значительно лучше, чем у обычного привода от сети и частотно-регулируемого привода (ЧРП) по схеме с двумя трансформаторами [10].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Птах Г. К. Вентильно-индукторный реактивный электропривод средней и большой мощности: зарубежный и отечественный опыт // Электротехника: сетевой электрон. науч. журн. 2015. Т. 2, № 3. С. 23–33.

2. Темирёв А. П. Математическое моделирование, проектирование и экспериментальное определение параметров вентильно-индукторных электроприводов. Новочеркасск: ЛИК, 2011. 794 с.



3. Нгуен Куанг Кхоа. Проектирование и моделирование лопастных насосов в среде SolidWorks 2012 с использованием пакета FlowSimulation 2012 // Интеллектуальные электромеханические системы и комплексы специального назначения: материалы межотраслевого науч.-техн. семинара. Новочеркасск, 10–12 июня 2014 г. Юж.-Рос. гос. политехн. ун-т (НПИ). 2014. С. 128–133.

4. Нгуен Куанг Кхоа. Исследование электромеханического комплекса: вентильно-индукторный электропривод – центробежный насос // Изв. вузов. Электромеханика. 2016. № 4. С. 55–64.

5. Никифоров Б. В. Корабельные системы электродвижения: дис. ... д-ра техн. наук. СПб., 2006. 369 с.

6. Нгуен Куанг Кхоа. Методика моделирования вентильно-индукторных двигателей с помощью программ Elcut и MatlabSimulink // Изв. вузов. Электромеханика. 2016. № 2. С. 73–79.

7. Дубицкий С. Д. Elcut 5.1-платформа разработки приложений анализа полей // ExponentaPro. Математика в приложениях. 2004. № 1. С. 20–26.

8. Нгуен Куанг Кхоа, Фам Конг Тао, Фам Ван Бьен. Методика математического и экспериментального определения энергетических параметров вентильно-индукторного двигателя большой мощности двухпакетной конструкции // Успехи современной науки. 2016. Т. 4, № 9. С. 149–155.

9. Бычков М. Г., Сусси Р. С. Расчетные соотношения для определения главных размеров вентильно-индукторной машины // Электротехника. 2000. № 3. С. 15–19.

10. Сайт Телерадиокомпании «Алмазный край» АК «АЛРОСА» (ОАО). Прогресс на производстве. URL: <http://trk-alrosa.ru/syuzhetyi/udachnyiy/2037-progress-na-proizvodstve.html> (дата обращения: 31.10.2016).

A. P. Temirev, Nguyen Quang Khoa  
South-Russian State Polytechnic University (NPI)

## RESEARCH OF THE HIGH POWER TWO-PACKAGE SWITCHED RELUCTANCE MOTOR FOR PULP PUMPS GRAT-1800/67 OF A MINING EQUIPMENT

*Researched the high power two-package switched reluctance motor 750 kW (SRM-750) for pulp pumps GRAT-1800/67 of mining equipment. Presents simulation of the SRM-750 as part of the pump GRAT-1800/67 for single-pulse mode of switching. Presents dependences of main indexes of the SRM-750 on switching parameters, and on their basis created trajectories of control parameters, which allow to realize given mechanical characteristics and to ensure the quality of work SRM-750 in different modes. Experimental research of different modes of the SRM-750 to verify the functioning and management quality on selected switching parameters.*

**Switched reluctance motor (SRM), switched reluctance electric drive (SRD), electric drive, high power switched reluctance machine (HP SRM), pulp pump**

УДК 62-531.7

И. С. Дымов, Д. А. Котин, Е. С. Кучер, Ю. В. Панкрац  
Новосибирский государственный технический университет

## Подход к реализации процесса активной стабилизации пространственного положения ротора устройств мехатроники

*Рассматривается разработка и исследование технических решений вопроса центрирования пространственного положения ротора мехатронного устройства, применяемого в прецизионных технологических установках. Предлагается новый подход к решению проблемы стабилизации вращающейся части мехатронного устройства, основанный на активной текущей коррекции его пространственного положения. Приводятся описание способа реализации и результаты имитационного моделирования, подтверждающие перспективность направления исследования.*

**Мехатронное устройство, активная стабилизация, балансировка, регулятор пространственного положения**

Согласно определению, мехатронное устройство объединяет в себе механическую, электротехническую, электронную, интеллектуальную (компьютерную) части [1]. Все они интегрированы в общий модуль и согласованно взаимодей-

ствуют друг с другом, а их работа подчинена одной общей задаче. При этом развитие какой-либо отрасли техники в отдельности неизбежно находит свое отражение в мехатронике в целом.