

Сравнительный анализ электромагнитных процессов

в структурах электроприводов нефтедобывающей промышленности

Рассматриваются вопросы электромагнитной совместимости станций управления в структурах приводов для нефтедобывающей промышленности с различными исполнительными двигателями (асинхронным и вентильным) при наличии «длинного кабеля» токоподвода к погружному электродвигателю (ПЭД).

**Владимир Павленко, к. т. н.
Валерий Климов, к. т. н.
Иван Климов**

В настоящее время в нефтедобывающей промышленности взамен нерегулируемых ПЭД на основе асинхронных двигателей все более широкое применение находят регулируемые приводы с преобразователями частоты (ПЧ). Среди указанного вида оборудования можно выделить приводы с использованием асинхронного (АД) и вентильного (ВД) двигателей.

Применение ПЧ в приводе с асинхронным двигателем позволяет решить вопрос регулирования частоты вращения насоса, однако не может повысить его эффективность по сравнению с вентильным двигателем. Кроме того, существует проблема электромагнитной совместимости станции управления с исполнительным двигателем при наличии «длинного кабеля» токоподвода. Это особо проявляется в системах с высокочастотными IGBT-инверторами с ШИМ-управлением в регулируемом электроприводе с АД. В таких системах возможны значительные перенапряжения в кабеле, соединяющем обмотки двигателя с выходом инвертора, и на входе асинхронного двигателя, что снижает надежность привода. Далее будет рассмотрена природа возникновения перенапряжений, отрицательные факторы влияния высших гармоник и пути их снижения.

При использовании вентильного двигателя обеспечивается более высокий КПД привода и хорошие регулировочные характеристики при более низкой частоте коммутации транзисторов инвертора. Ниже дается сравнительный анализ спектрального состава выходного напряжения станций управления с ШИМ-инвертором и коммутатором ВД.

Структурная схема привода и участка энергоснабжения от ТП

На рис. 1 приведена структурная схема привода и участок энергоснабжения от трансформаторной подстанции (ТП) до подключения ко входу станции управления (СУ) привода, на выходе которой установлен повышающий трансформатор напряжения (ТМПН). Структура содержит участок сетевой линии, на котором происходит потеря мощности ΔP_C и участок кабельной линии, подключающий ПЭД (вентильный или асинхронный) к наземной части привода (станции управления и повышающему трансформатору), где также происходит потеря мощности ΔP_K .

Анализ существующих структур регулируемых приводов погружных насосов

Структура привода с преобразователем частоты и асинхронным двигателем (ПЧ+АД)

ПЧ позволяет регулировать частоту вращения асинхронного двигателя. Преобразователи частоты выполняются на основе двухзвенного преобразователя (выпрямитель+инвертор). Выходной каскад станции управления представляет собой трехфазный инвертор, который может быть выполнен на основе алгоритмов двухуровневой ШИМ или трехуровневой ШИМ с частотой коммутации IGBT-транзисторов f_k в диапазоне 2–10 кГц [1].

Величина напряжения питания инвертора выбирается из соотношения:

$$U_{II} = (2\sqrt{2}U_{\partial\partial})/m, \quad (1)$$

где $U_{\partial\partial}$ — действующее значение фазного выходного напряжения основной частоты.

Коэффициент модуляции m определяет минимальную длительность импульса выходного напряжения инвертора и, следовательно, позволяет выбирать величину номинального напряжения с учетом времени запаривания IGBT ($m = 0,8-0,9$).

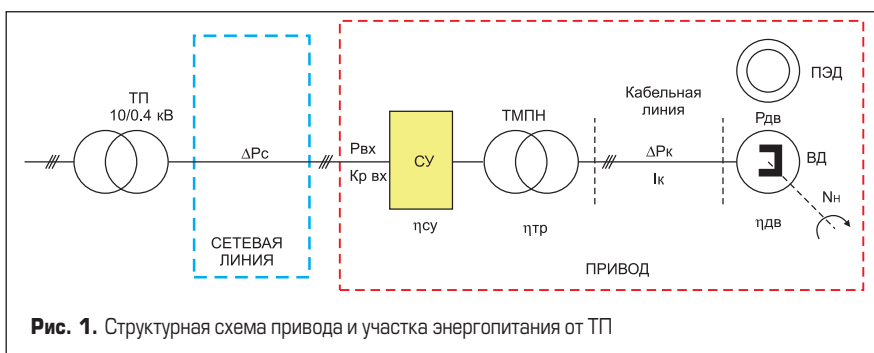


Рис. 1. Структурная схема привода и участка энергоснабжения от ТП

Современные алгоритмы управления инвертором позволяют регулировать частоту основной гармоники выходного напряжения и поддерживать необходимую величину его действующего значения. Однако выходное напряжение ШИМ-инвертора, помимо основной гармоники (U_1), содержит широкий спектр высших гармоник (U_n) с частотами, кратными частоте коммутации f_k . Действующее значение выходного напряжения инвертора станции управления может быть представлено следующим образом:

$$U_{\text{вых}} = \sqrt{U_1^2 + \sum U_n^2}. \quad (2)$$

При исследовании высших гармоник питающего напряжения важным вопросом является их влияние на снижение КПД и коэффициента мощности привода, что приводит к увеличению значения полной мощности, потребляемой из сети, и расчетной мощности повышающего трансформатора. На рис. 2 и 3 приведены осциллограммы выходного напряжения и тока трехуровневого инвертора. На рисунках видно, что напряжение ПЧ содержит высокий состав в значительной мере влияющих на надежность работы привода высших гармоник, оценка которых будет дана ниже. В общем случае полная мощность (S) с учетом высших гармоник определяется тремя составляющими:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + H^2}, \quad (3)$$

где P — активная мощность (Вт), Q — реактивная мощность (ВАр), H — мощность искажения (ВА).

Наличие мощности искажения, вызываемой составляющими высших гармоник, объясняет требование определенного увеличения полной мощности повышающего трансформатора в приводе с ПЧ. Эффективность привода будет, в основном, определяться КПД асинхронного двигателя, значение которого ниже, чем у вентильного двигателя.

Структура привода с вентильным двигателем

ВД представляет собой совокупность транзисторного коммутатора (инвертора) и синхронного двигателя с постоянными магнитами (СДПМ). Станция управления ВД является системой с двойным преобразованием энергии и содержит 6-пульсный выпрямитель, звено постоянного тока с импульсным регулятором постоянного напряжения и IGBT-коммутатор (рис. 4). Инвертирование постоянного напряжения в переменное осуществляется мостовым трехфазным коммутатором при 120-градусной длительности импульса напряжения на каждом полупериоде выходного напряжения с паузами в 60 электрических градусов между положительными и отрицательными полупериодами выходного напряжения [2]. Система управления осуществляет регулирование величины и частоты выходного напряжения, защиту от токов перегрузки и короткого замыкания, а также от недопустимых отклонений питающей сети. Регулирование частоты вращения

и момента вентильного двигателя осуществляется путем изменения напряжения питания инвертора с помощью регулятора и частоты коммутации силовых транзисторов коммутатора. Бездатчиковая система управления ВД обеспечивается алгоритмом измерения напряжения на одной из фаз двигателя в моменты, когда в ней не протекает ток. Переключение фаз осуществляется в строго определенные моменты времени, которые соответствуют заданному значению противоЭДС на интервале времени, когда ток фазы равен нулю.

Транзисторный ШИМ-регулятор (4 кГц) представляет собой понижающий преобразователь

постоянного напряжения. Принципиальная схема силовой цепи регулятора напряжения (РН) содержит (рис. 4): VT1 — силовой транзистор

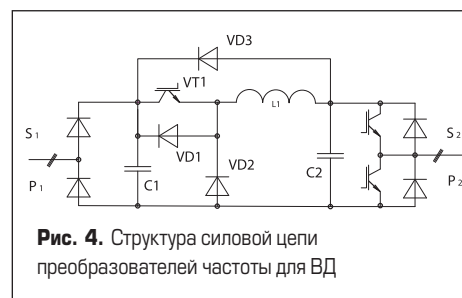


Рис. 4. Структура силовой цепи преобразователей частоты для ВД

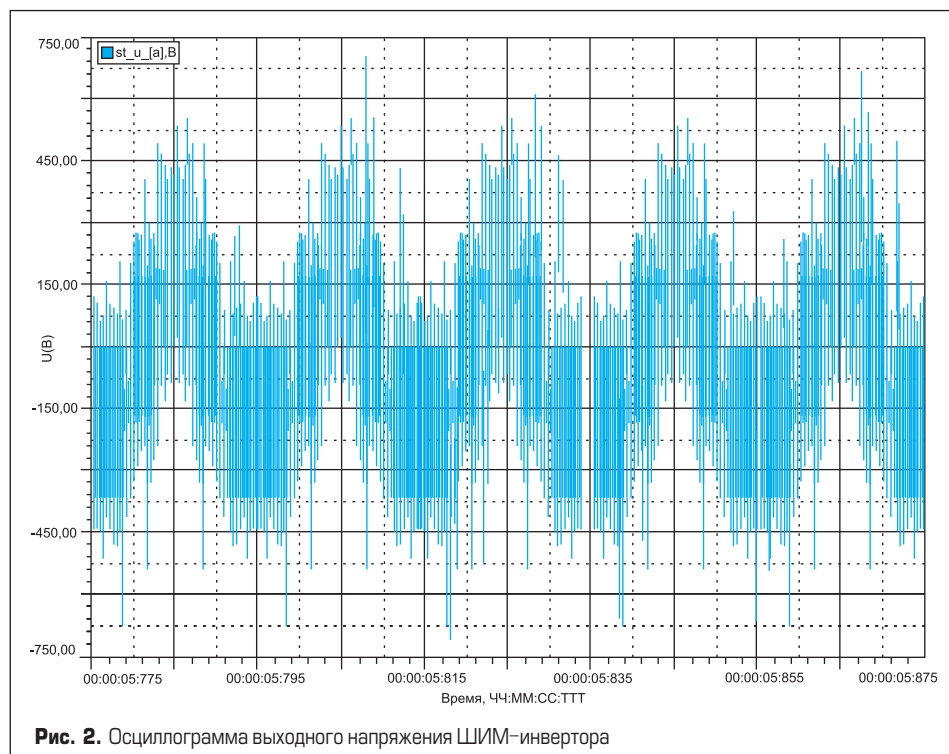


Рис. 2. Осциллограмма выходного напряжения ШИМ-инвертора

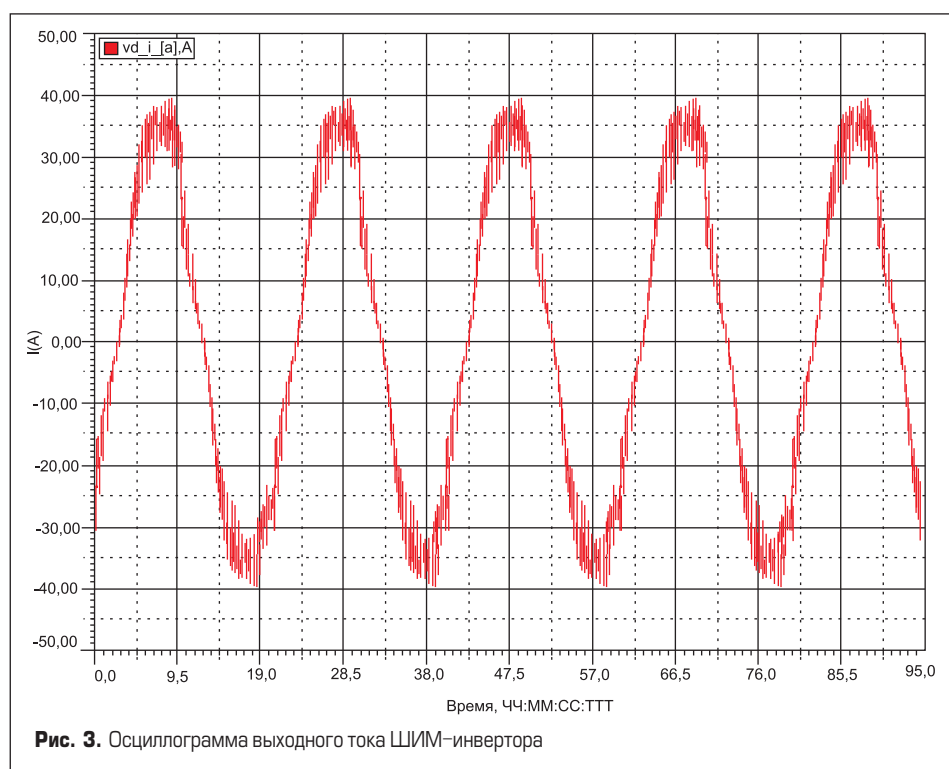


Рис. 3. Осциллограмма выходного тока ШИМ-инвертора

с ШИМ-управлением на фиксированной частоте 4 кГц; VD1–VD3 — обратные диоды цепи защиты силового IGBT; C1 — емкость входного фильтра PH; C2 — емкость выходного фильтра PH; L1 — дроссель выходного фильтра PH.

Взаимодействие коммутатора с вентильным двигателем в первую очередь основано на создании в обмотках статора необходимой формы тока. Все важнейшие характеристики двигателя определяются величиной и формой тока статора. На рис. 5 и 6 представлены временные диаграммы выходного напряжения и тока коммутатора вентильного двигателя. Коммутация фаз двигателя вызывает переходные процессы в контурах, образованных секциями обмоток

статора, транзисторами и диодами коммутатора. Питание обмоток статора ВД осуществляется от коммутатора напряжения через повышающий трехфазный трансформатор, выполненный по схеме «звезда–звезда».

Энергетическая эффективность приводов

Энергетическая эффективность привода определяется сопоставлением потребляемой установкой с погружным насосом активной электрической мощности при использовании ВД с мощностью, потребляемой установкой с АД в одной и той же скважине при подъеме равного коли-

чества жидкости с одинакового динамического уровня при одинаковом давлении.

Активная мощность, потребляемая приводом ($P_{пр}$), определяется выражением:

$$P_{пр} = (P_{\delta} + \Delta P_{\kappa}) / \eta_{\text{cy}} \times \eta_{\text{тр}} \times \eta_{\delta\phi\phi} \quad (4)$$

где P_{δ} — электрическая мощность, потребляемая электродвигателем; ΔP_{κ} — потери мощности в кабеле токопровода; η_{cy} — КПД станции управления; $\eta_{\text{тр}}$ — КПД повышающего трансформатора; $\eta_{\delta\phi\phi}$ — КПД выходного фильтра.

КПД привода без учета потерь в кабеле токопровода:

$$\eta_{пр} = \eta_{\delta\phi} \times \eta_{\text{cy}} \times \eta_{\text{тр}} \times \eta_{\delta\phi\phi} \quad (5)$$

где $\eta_{\delta\phi}$ — КПД электродвигателя.

Оценка энергетической эффективности приводов проводилась на основе экспериментальных исследований с использованием специализированного испытательного стенда СИ ЭППУ, разработанного на предприятии ООО «РИТЭК-ИТЦ» (аттестат ВНИИМС №36 от 25.12.2008). Стенд содержит необходимые измерительные, регистрирующие, нагрузочные средства и предназначен для натурно-физического моделирования работы привода в условиях, приближенных к реальным условиям эксплуатации ПЭД на скважине [3].

На рис. 7 приведены экспериментальные зависимости КПД от коэффициента загрузки приводов при различных длинах кабеля токопровода [4]. Наличие кабеля приводит к дополнительным потерям мощности и, следовательно, к снижению общего КПД приводов. Потери мощности в кабеле ΔP_{κ} зависят от длины и сечения жилы кабеля, от действующего значения фазного тока двигателя и температурного режима окружающей среды. В табл. 1 сведены экспериментальные значения КПД приводов разных типов и их составляющие: КПД двигателя (ДВ), КПД станций управления (СУ), КПД повышающего трансформатора (ПТ) и выходного фильтра (ВФ) при номинальной нагрузке 32 кВт. Приведены значения при непосредственном подключении электродвигателя к повышающему трансформатору.

Таблица 1. Значения КПД приводов

Параметр	Тип привода		
	ПЭД	ПЧ-ПЭД	ВД
КПД СУ	–	0,97	0,97
КПД ПТ	0,97	0,97	0,97
КПД ДВ	0,845	0,81	0,917
КПД ВФ	–	0,97	–
КПД привода	0,816	0,739	0,86

Как показывают зависимости КПД приводов от нагрузки, при одинаковых частотах вращения насоса наибольшее значение КПД достигается при использовании вентильного привода.

Относительные потери активной мощности в сетевой линии ΔP_{κ} при равенстве фактических мощностей, потребляемых насосами при использовании ВД и АД, можно оценить значениями обобщенного энергетического показателя.

Обозначим обобщенный показатель энергетической эффективности K_{Σ} :

$$K_{\Sigma} = K_{\rho} \times \eta_{пр} \quad (6)$$

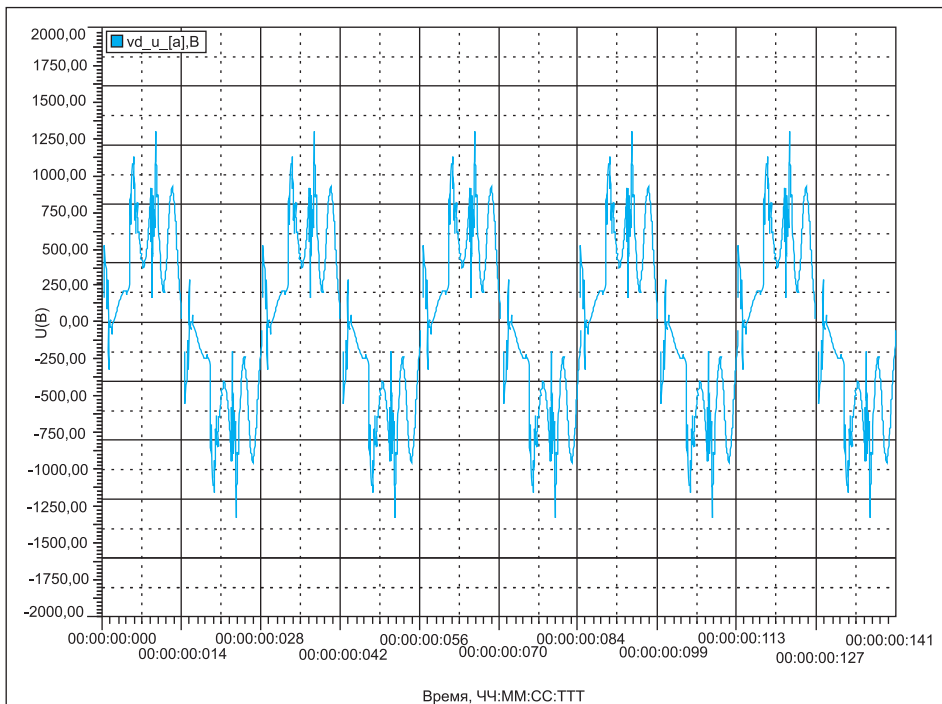


Рис. 5. Осциллограмма выходного напряжения коммутатора ВД

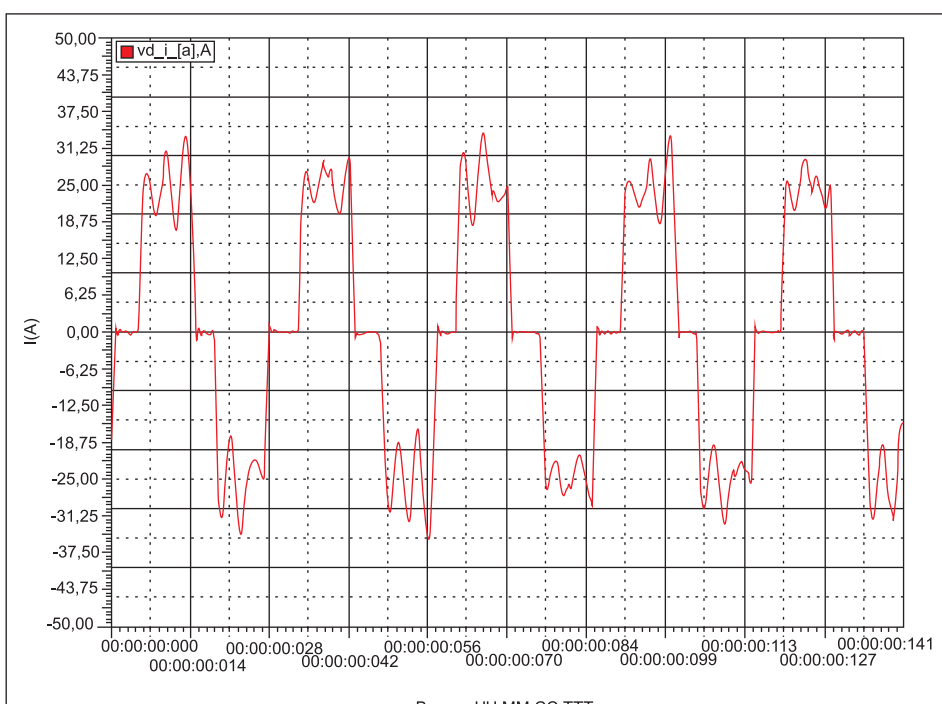


Рис. 6. Осциллограмма выходного тока коммутатора ВД

где $K_{p\text{ вх}}$ — коэффициент мощности на входе станции управления; η_{np} — КПД привода.

Можно показать, что относительные потери активной мощности в сетевой линии при равенстве фактических мощностей, потребляемых приводами с ВД и АД, обратно пропорциональны квадрату значений обобщенных энергетических показателей:

$$\Delta \bar{P}_c = 1/K_3^2. \quad (7)$$

Относительное снижение потерь в сетевой линии при замене привода с АД на привод с ВД определяется по формуле:

$$\Delta \bar{P}_c = [1 - (K_{3a}/K_{3б})^2] \times 100\%. \quad (8)$$

При значениях КПД приводов с ВД и ПЧ-ПЭД, приведенных в табл. 1, и равном входном коэффициенте мощности станций управления (0,95) в номинальном режиме работы приводов относительное снижение потерь мощности в сетевой линии при замене ПЭД на ВД составит 26%.

Электромагнитная совместимость в системе преобразователь частоты — асинхронный двигатель с длинным кабелем

Проблема электромагнитной совместимости (ЭМС) ШИМ-инвертора станции управления с исполнительным двигателем электропривода наиболее ощутима при наличии «длинного кабеля». Применение транзисторных IGBT-инверторов с высокочастотным ШИМ-управлением в регулируемом электроприводе вызывает значительные перенапряжения в кабеле, соединяющем обмотки двигателя с выходом инвертора, и на входе двигателя. Выходное напряжение ШИМ-инвертора в преобразователях частоты для асинхронных двигателей представляет собой высокочастотную последовательность прямоугольных импульсов различной длительности и полярности с высокой крутизной фронтов (рис. 2). Крутизна фронта t_ϕ импульсов напряжения определяется скоростью

переключения силовых ключей инвертора и при использовании IGBT-транзисторов может составлять 0,05–0,1 мкс. Высокие значения dU/dt при прохождении импульсного сигнала вызывают волновые процессы в кабеле, приводящие к возникновению перенапряжений на входе двигателя.

Токоподводящий трехфазный кабель в системе электропривода можно рассматривать как однородную длинную линию с распределенными параметрами, элементарный участок которой состоит из активного сопротивления, последовательной индуктивности и параллельной емкости. Волновое сопротивление кабеля Z_0 составляет 100–200 Ом.

Входным сопротивлением кабеля Z_1 являются выходные сопротивления инвертора и повышающего трансформатора. Значение Z_1 на частоте коммутации инвертора оказывается мало по сравнению с Z_0 , в связи с чем можно считать $Z_1 \ll Z_0$.

Выходным сопротивлением кабеля Z_2 является относительно большое для высокочастотного сигнала ШИМ входное сопротивление двигателя, определяемое индуктивностью его обмоток $L_{\phi\phi}$ и эквивалентной частотой фронта импульса t_ϕ :

$$Z_2 = \pi/t_\phi \times L_{\phi\phi} \quad (9)$$

Для двигателей мощностью 30–150 кВт это составляет 1–10 кОм, поэтому $Z_2 \gg Z_0$.

Таким образом, при прохождении крутого фронта импульса напряжения вход кабеля (со стороны инвертора) работает в режиме короткого замыкания, а выход (со стороны двигателя) — в режиме холостого хода. Скорость распространения высокочастотной волны (фронта импульса) по кабелю составляет 100–150 м/мкс [7]. Время прохождения импульса от выхода инвертора до двигателя определяется длиной кабеля. Если это время больше или равно времени фронта импульса t_ϕ , то из-за несогласованности волнового сопротивления кабеля с нагрузкой в конце кабеля возникает отраженная волна напряжения U_2 , которая суммируется с падающей

щей (прямой) волной напряжения U_1 , образуя на входе двигателя повышенное напряжение:

$$U_{\phi\phi} = U_1(1+n_2), \quad (10)$$

где коэффициент отражения

$$n_2 = (Z_2 - Z_0)/(Z_2 + Z_0) \leq 1. \quad (11)$$

Зависимость коэффициента отражения от мощности двигателя приведена в табл. 2 [7].

Таблица 2. Значения коэффициента отражения

Мощность, кВт	n_2
19	0,9
37	0,83
75	0,76
150	0,65

Таким образом, прохождение импульсного сигнала с крутым фронтом вызывает в кабеле волновые процессы, приводящие к перенапряжениям на обмотках двигателя. Высокие значения импульсного перенапряжения в сочетании с высокой крутизной его фронта могут привести к снижению срока службы изоляции кабеля и обмоток.

Импульс напряжения, распространяющийся по длинной линии и получивший удвоение напряжения, будет приложен к обмоткам двигателя. Последние характеризуются паразитными емкостями, которые в значительной мере могут влиять на распределение импульса напряжения между витками обмоток [8]. На рис. 8а представлена эквивалентная схема распределения

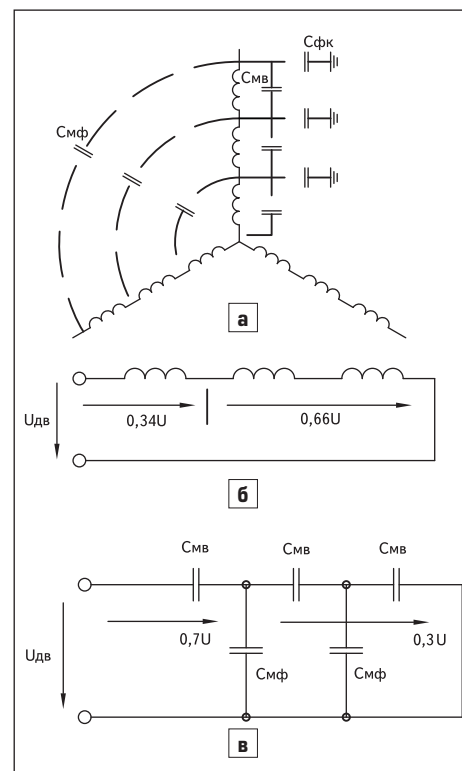
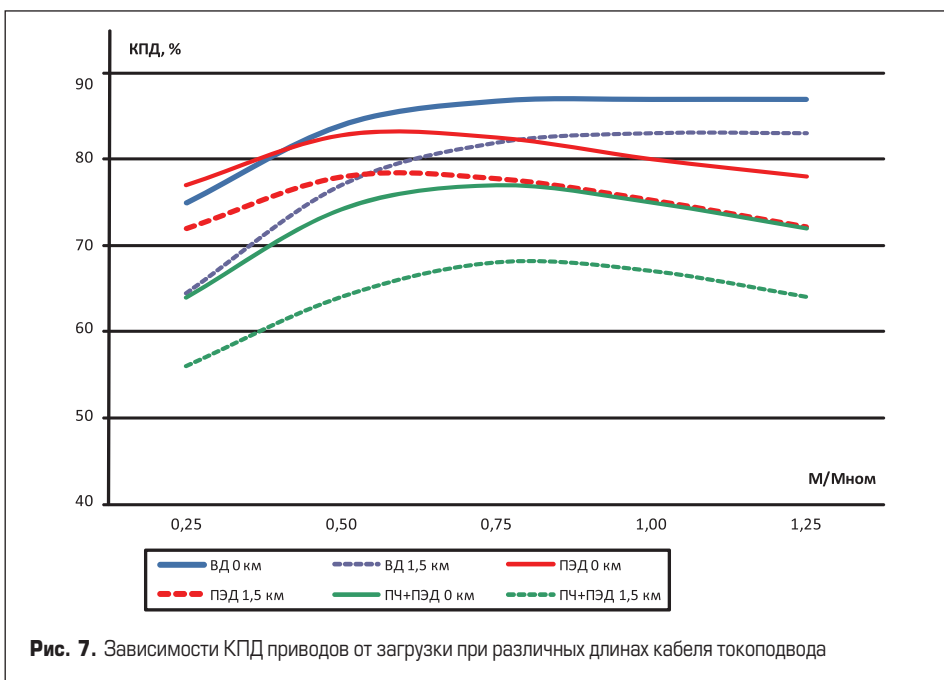


Рис. 8. Эквивалентные схемы обмоток АД: а) эквивалентная схема распределения паразитных емкостей обмоток двигателя; б) эквивалентная схема фазы двигателя при синусоидальной форме напряжения; в) эквивалентная емкостная схема распределения импульса

паразитных емкостей обмоток двигателя. Здесь приняты обозначения: $C_{мв}$ — межвитковые паразитные емкости; $C_{мф}$ — межфазные паразитные емкости; $C_{фк}$ — паразитные емкости фаза–корпус двигателя. Эквивалентная схема фазы двигателя при синусоидальной форме напряжения (рис. 8б) показывает равномерное распределение напряжения между секциями обмотки. Иная картина имеет место при воздействии импульса напряжения. Это видно из эквивалентной емкости схемы распределения импульса в фазной обмотке двигателя (рис. 8в). Полагая $C_{мв} = C_{мф}$, можно показать, что напряжение на первых витках обмотки составит 62,5% значения импульса напряжения, приложенного к выводам статора двигателя. При $C_{мв} < C_{мф}$ к обмотке первой секции двигателя может быть приложено до 70% импульса напряжения питания. Это обстоятельство необходимо учитывать при проектировании двигателя, повышая изоляционные свойства его обмоток.

Так как длина токоподводящего кабеля для погружных насосов может достигать 3 км, то необходимо предусматривать меры по ограничению перенапряжений в системе питания двигателя. Среди них можно указать:

- использование выходного дросселя инвертора;
- применение низкочастотного выходного LC-фильтра.

Наличие выходного дросселя инвертора приводит к затягиванию фронта импульса до 4 и более микросекунд при относительном значении реактивной составляющей сопротивления дросселя $X_s = 3-5\%$. Это снижает возможные перенапряжения на обмотках двигателя и скорость нарастания пиков перенапряжений. Дроссели подбираются по номинальному току и индуктивности [6]. Выходной дроссель создает дополнительные потери мощности в приводе, составляющие 2–3% при номинальном режиме, и не позволяет полностью решить проблему перенапряжений при значительных длинах кабеля. Кроме того, дополнительная индуктивность на выходе инвертора снижает резонансную частоту длинной линии токоподвода, что увеличивает вероятность резонансных явлений на высших гармониках.

Использование низкочастотного выходного LC-фильтра, получившего название «синусный», позволяющее приблизить напряжения на входе повышающего трансформатора к синусоидальной форме. В табл. 3 приведены основные технические характеристики фильтра типа CNW 933 [9]. Такие фильтры рекомендуется применять при частоте коммутации ШИМ-инвертора 4 кГц и более. Напряжение короткого замыкания трехфазного дросселя составляет 8% при номинальном напряжении 400 В. Емкости фильтра включены треугольником.

Сравнительный анализ спектрального состава выходных напряжений станций управления с асинхронным и вентильным двигателями

Выходное напряжение ШИМ-инвертора содержит основную гармонику f_1 , величина которой пропорциональна выбранному коэффици-

енту модуляции m , и высокочастотные гармоники, сконцентрированные в области кратных целых значений частоты коммутации [10]:

$$f_n = af_k \pm bf_1, \quad (12)$$

где f_1 — основная частота (первая гармоника); f_k — частота коммутации транзисторов инвертора; $a = 0, 1, 2, \dots$ — кратность группы высокочастотных гармоник; $b = 1, 2, 3, \dots$ — кратность основной частоты в группе высокочастотных гармоник. Первая низшая из высших гармонических составляющих, энергию которой необходимо учитывать при анализе систем, представляет частоту $(f_k - 2f_1)$.

На рис. 9 и 10 приведены экспериментальные амплитудные спектры выходного напряжения ШИМ-инвертора при непосредственном подключении АД к станции управления (рис. 9) и наличии кабеля токоподвода длиной 1500 м (рис. 10). Частота коммутации IGBT-инвертора составляла 2,5 кГц при частоте

основной гармоники 50 Гц. В табл. 4 представлены частоты групп наиболее весомых высших гармоник в спектре выходного напряжения ШИМ-инвертора, полученные из анализа амплитудных спектров (рис. 9 и 10).

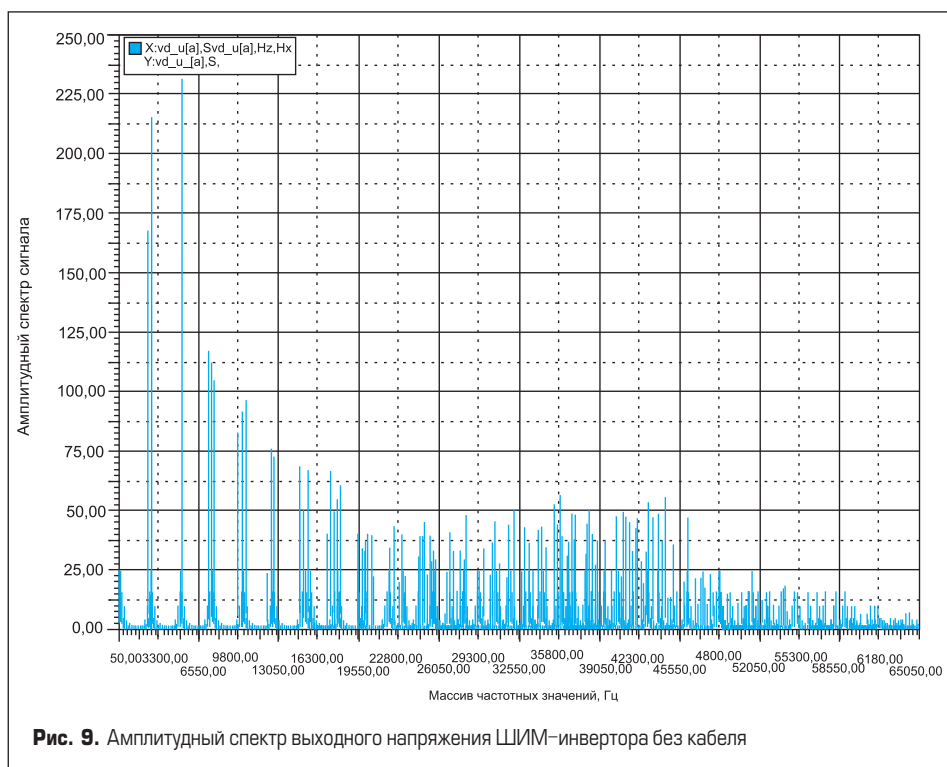
Здесь следует отметить выраженность резонансного явления при наличии длинного кабеля. Значение резонансной частоты кабеля снижается при увеличении его длины. Так, если длина кабеля составляет 100 м, то резонансная частота будет в диапазоне 0,5–1,5 МГц [6]. При длинах 1–2 км она уменьшается и сдвигается к значениям частот высших гармоник выходного напряжения ШИМ-инвертора. При этом происходит резкий рост амплитуд группы гармоник в области, совпадающей с резонансной частотой кабеля. На рис. 10 это явление отмечается на частотах, близких к 10 кГц, где амплитуда высших гармоник напряжения увеличивается в 5 раз. Такие резонансные явления еще в большей степени ухудшают электромагнитную совме-

Таблица 3. Параметры синусного фильтра

Номинальный ток, А	Индуктивность фазы дросселя, мГн	Емкость фильтра, мкФ	Потери при 8 кГц и длине кабеля 200 м, Вт	Масса общая, кг
20	2,9	1,5	75	10,5
30	2,0	2,2	138	16
48	1,2	4,7	170	28
60	0,98	6,8	185	32
75	0,79	6,8	225	37
90	0,68	8,0	320	48
115	0,6	12	380	60

Таблица 4. Значения частот высших гармоник ШИМ-инвертора

Длина кабеля, м	Относительные значения (%) частот групп высших гармоник (кГц)						
	2,5	5	7,5	10	12,5	15	18,5
15	20	22	10	8	7,5	5	5
1500	20	25	17,5	40	15	5	2,5



стимость инвертора с двигателем и вызывают перенапряжения, превосходящие напряжение питания инвертора в 2–2,5 раза [6].

На рис. 11 приведен амплитудный спектр выходного напряжения коммутатора станции управления ВД при частоте коммутации 35 Гц, соответствующей частоте вращения 8-полюсного двигателя 525 об/мин.

В табл. 5 представлены частоты наиболее весомых высших гармоник выходного напряжения при частоте коммутации 35 Гц и 200 Гц, соответствующей максимальной частоте вращения ВД 3000 об/мин.

Таблица 5. Значения частот высших гармоник коммутатора ВД

Частота коммутации f_1 , Гц	Частоты высших гармоник, Гц					
	f_3	f_7	f_7+f_1	f_7+2f_1	$f_{11}-f_1$	f_{11}
35	175	245	280	315	350	385
200	1000	1400	1600	1800	2000	2200

Энергия высших гармоник находится в диапазоне частот 175–385 Гц при минимальной частоте вращения ВД и в диапазоне 1000–2200 Гц при максимальной частоте вра-

щения ВД, что находится значительно левее резонансной частоты кабеля и не вызывает усиления какой-либо высшей гармоники.

Как видно из сравнения спектрального состава выходного напряжения, при использовании ШИМ-инвертора в приводе с АД возникают на порядок более высокие частоты гармонических составляющих по сравнению с коммутатором ВД, вызывающие негативное влияние на ресурсное состояние обмоток асинхронного двигателя и изоляцию кабеля токоподвода.

Выводы

1. Вентильный привод, обладая повышенным КПД по сравнению с другими типами приводов, является наиболее эффективным при использовании его для регулирования частоты вращения центробежных и винтовых погружных насосов в нефтедобывающей промышленности.
2. Спектральный состав выходного напряжения при использовании ШИМ-инвертора имеет на порядок более высокие частоты гармонических составляющих по сравнению с коммутатором ВД, что вызывает негативное влияние на ресурсное состояние обмоток асинхронного двигателя и изоляцию кабеля токоподвода. Применение ШИМ-инвертора в составе привода с ПЭД требует дополнительного выходного фильтра, снижающего общий КПД системы.

Литература

1. Лазарев Г. Высоковольтные преобразователи для частотно-регулируемого электропривода. Построение различных систем // Новости электротехники. 2005. № 2 (32).
2. Статические преобразователи в электроприводах переменного тока. Л.: Наука. 1968.
3. Павленко В., Гинзбург М. Обоснование диапазона регулирования частот вращения приводов на основе вентильных электродвигателей // Технологии ТЭК. 2006. № 5.
4. Сравнительные исследования энергетических характеристик приводов погружных насосов с асинхронными и вентильными двигателями. Отчет НИР. М.: ООО «РИТЭК-ИТЦ». 2009.
5. Зайцев А. В., Лядов Ю. С. Регулируемый электропривод и его роль в энергосбережении // Электротехнические комплексы и системы управления. 2006. № 2.
6. Hibbard J., Hayes N. Предотвращение аварий двигателя при его удаленном подключении к преобразователю частоты на IGBT // Электротехнический рынок. 2007. № 9 (15).
7. Hink K. M. Low Cost Motor Protection Filters for PWM Drive Applications Stops Motor Damage. Power Quality Conference. 1999.
8. Presentation VFD Control. Part 4. Output issues with VFDs. Siemens. 2004.
9. Sinusoidal Filter Type CNW 933. 2004. www.reospain.com
10. Mohan N., Robbins U. Power Electronics: Converters, Application and Design. USA. 2003.

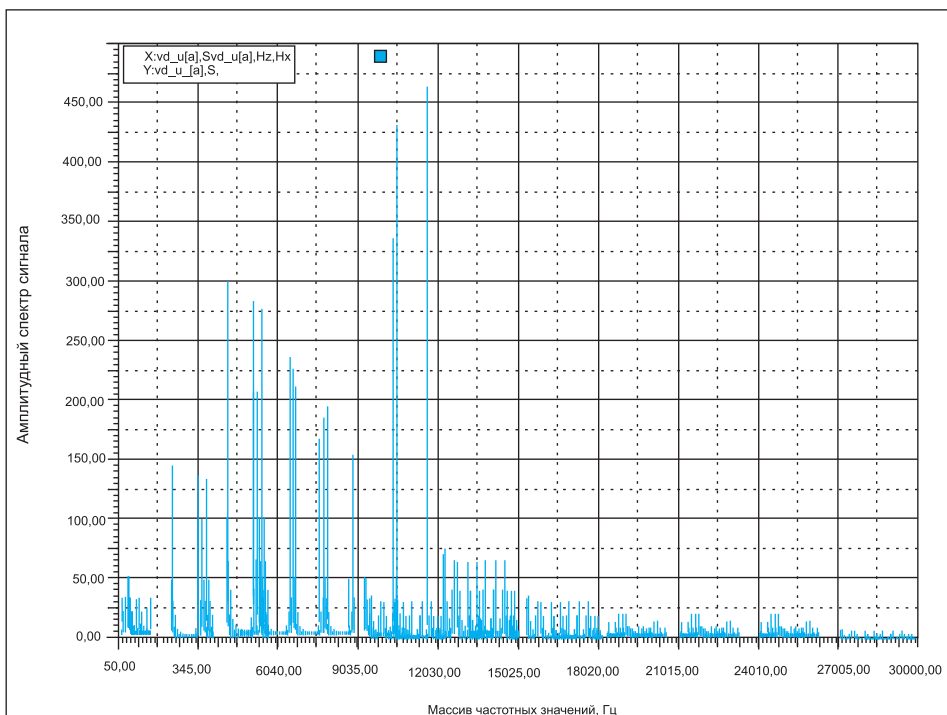


Рис. 10. Амплитудный спектр выходного напряжения ШИМ-инвертора с кабелем длиной 1500 м

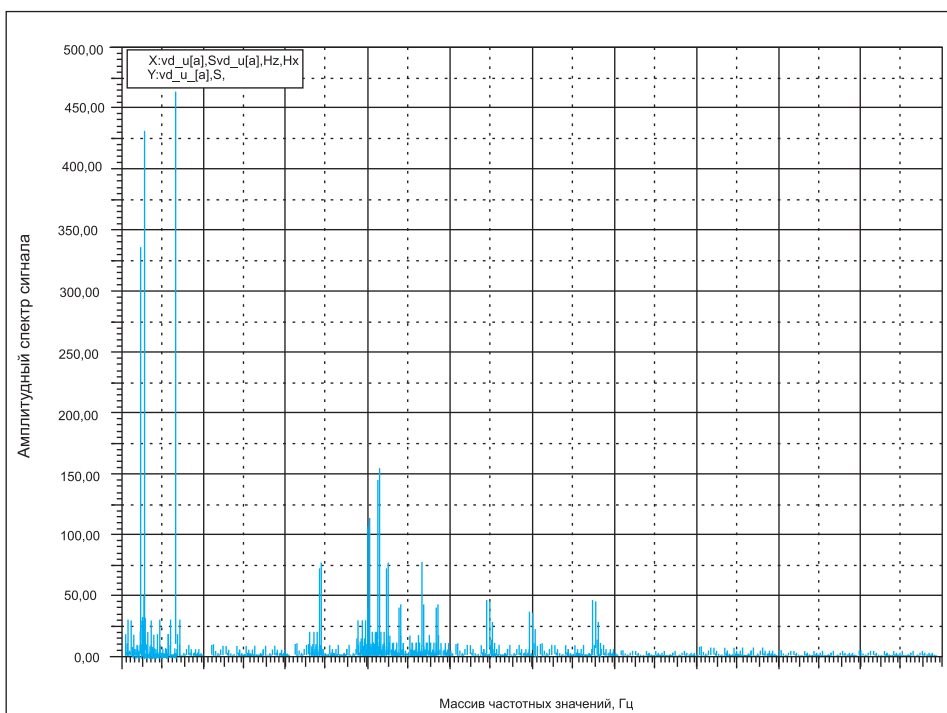


Рис. 11. Амплитудный спектр выходного напряжения коммутатора ВД