

ЛИТЕРАТУРА

1. П р а в и л а пользования электрической и тепловой энергией. – Минск: Тыздзень, 1996. – 176 с.
2. Г о р д е е в, В. И. Регулирование максимума нагрузки промышленных электрических сетей / В. И. Гордеев. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 184 с.
3. Г о л о в к и н, П. И. Энергосистема и потребители электрической энергии / П. И. Головкин. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 360 с.
4. Ф е д о р о в, А. А. Основы электроснабжения промышленных предприятий / А. А. Федоров. – М.: Энергия, 1972. – 416 с.
5. Ф у р с а н о в, М. И. Определение и анализ потерь электроэнергии в электрических сетях энергосистем / М. И. Фурсанов. – Минск: УВИЦ при УП «Белэнергосбережение», 2005. – 207 с.

Представлена кафедрой
электроснабжения

Поступила 10.11.2010

УДК 621.315.2

ВЛИЯНИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ НА ИЗОЛЯЦИЮ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ НЕФТЕДОБЫВАЮЩИХ СТАНЦИЙ

**Кандидаты техн. наук, доценты ЗАЛИЗНЫЙ Д. И., ШИРОКОВ О. Г.,
КУХАРЕНКО С. Н., инж. УСТИМЕНКО Е. Ю.**

*Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого,
НГДУ «Речицанефть»*

Частотно-регулируемый электропривод имеет значительные функциональные возможности, что обеспечивает его самые различные области применения, в том числе и для погружных установок центробежных насосов нефтедобывающих станций. Однако в процессе эксплуатации сказываются негативные факторы, обусловленные влиянием высокочастотных составляющих напряжения, формируемого преобразователем частоты, на элементы привода: кабели, двигатели, трансформаторы и т. д. Это снижает надежность работы установки и соответственно ведет к возникновению аварийных ситуаций. Минимизация воздействия подобных факторов – одна из самых актуальных проблем в современной электротехнике.

В литературе анализируются различные причины отказов силовых кабелей для погружных электросистем [1] без применения частотно-регулируемого электропривода в силу накопленного значительного опыта эксплуатации. По теме применения преобразователей частоты такого опыта нет, публикации практически отсутствуют. Имеются лишь отчеты представителей нефтедобывающих предприятий, опубликованные в сети Интернет [2].

В данной статье рассмотрены последствия негативного влияния преобразователей частоты на изоляцию силовых кабелей, питающих погружные установки центробежных насосов нефтедобывающих станций ПО «Белоруснефть», а также предложены возможные пути для решения этой проблемы.

Совместно с преобразователями частоты в ПО «Белоруснефть» используют кабели типа КППБП. Это трехжильные плоские кабели с двухслойной изоляцией из блок-сополимера пропилена с этиленом, подушкой из нетканого полотна, покрытые стальной броней. Длительно допустимая температура изоляции составляет 120 °С.

Упрощенная схема конструктивного исполнения частотно-регулируемого электропривода погружного насоса на основе станции управления типа «Борец» приведена на рис. 1.



Рис. 1. Упрощенная схема конструктивного исполнения нефтедобывающей станции

В скважине на глубине от 200 до 3000 м находится погружной электродвигатель (ПЭД) с центробежным насосом и насосно-компрессорной трубой. Питание на ПЭД подается посредством кабельной линии, состоящей из основного кабеля, соединительной муфты (сростки) и удлинителя типа УБ. Удлинитель выполнен трехжильным бронированным кабелем с резиновой изоляцией, каждая жила находится в свинцовой оболочке.

Управление ПЭД осуществляется с помощью станции управления «Борец-04», в состав которой входят силовой преобразователь частоты на основе мощных транзисторов типа IGBT и контроллер. Сформированное преобразователем частоты управляющее напряжение 0,4 кВ через частотный фильтр подается на повышающий трансформатор типа ТМПН, где повышается до 1000–2000 В и поступает на вводы кабеля.

В процессе эксплуатации подобных установок наблюдались неоднократные повреждения и отказы силовых кабелей в виде оплавления и пробоя изоляции в непосредственной близости от соединительной муфты. Повреждения кабельных удлинителей не наблюдались. Результатом отказов была остановка станций посредством срабатывания защиты на понижение сопротивления изоляции. В некоторых случаях срок службы кабеля не превышал 100 дней.

В табл. 1 приведены основные сведения по отказам кабелей в нефтегазодобывающем управлении «Речицанефть».

Таблица 1

Сведения по отказам кабелей в НГДУ «Речицанефть»

Скважина	Период работы	Ревизия	Глубина спуска, м
№ 6 Осташковичского месторождения	03.2008–10.2008	Прогар изоляции основного кабеля в 20 см от места сродки с кабельным удлинителем	2670
Там же	10.2008–04.2009	Прогар изоляции основного кабеля в 35 м от места сродки с кабельным удлинителем	2575
№ 38 Дубровского месторождения	08.2008–12.2008	Прогар изоляции крайней жилы основного кабеля в 10 см от места сродки с кабельным удлинителем	2660

В процессе оплавления произошло расслоение изоляции жил с выделением жидкой фракции между слоями (рис. 2а, б). Изоляция практически полностью отслоилась от жилы, потеряв свою первоначальную форму и эластичность. В непосредственной близости от муфты имелись повреждения, свидетельствующие о междофазном коротком замыкании (рис. 2в). Ниже точки короткого замыкания непосредственно в самой муфте оплавление изоляции кабеля отсутствовало (рис. 2в). Выше по длине кабеля характер оплавления изоляции ослабевал, а над уровнем пластовой жидкости повреждения изоляции кабеля не наблюдались.

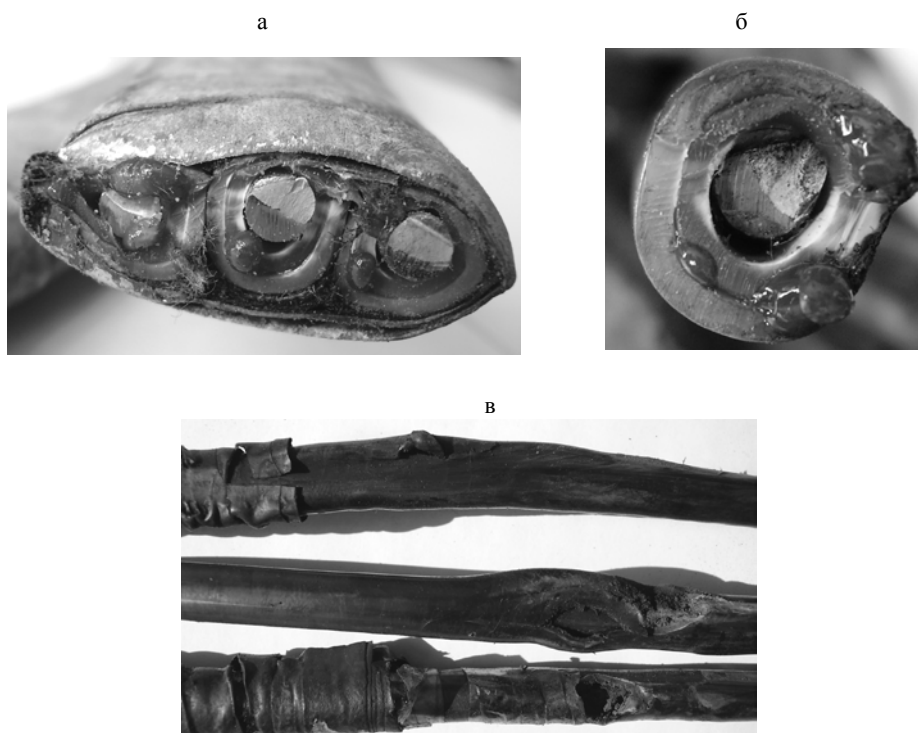


Рис. 2. Повреждения изоляции кабеля: а – силового; б – одной жилы; в – в разобранной муфте

Для выявления возможных причин повреждений кабелей авторами данной статьи были проведены исследования формы напряжений и токов, питающих ПЭД, на скважине № 7 Дубровского месторождения с кабелем КПпБП-3х16, ПЭД типа ЭДБТ 40-117 и длиной погружной части 2136 м.

На стороне высокого напряжения на вводах питающего кабеля были подключены измерительные трансформаторы напряжения и тока. Вторичные обмотки измерительных трансформаторов были соединены с соответствующими измерительными преобразователями переменного тока, к выходам которых, в свою очередь, был подключен многоканальный цифровой регистратор аналоговых сигналов с интерфейсом USB. Отсчеты мгновенных значений измеряемых величин – фазных напряжений и линейных токов – в реальном времени записывались в память портативного компьютера. Измерения проводились для частот питающего напряжения 30; 45; 50 и 60 Гц. Частота дискретизации по одному каналу составила 5 кГц. Примеры осциллограмм для частоты 50 Гц приведены на рис. 3.

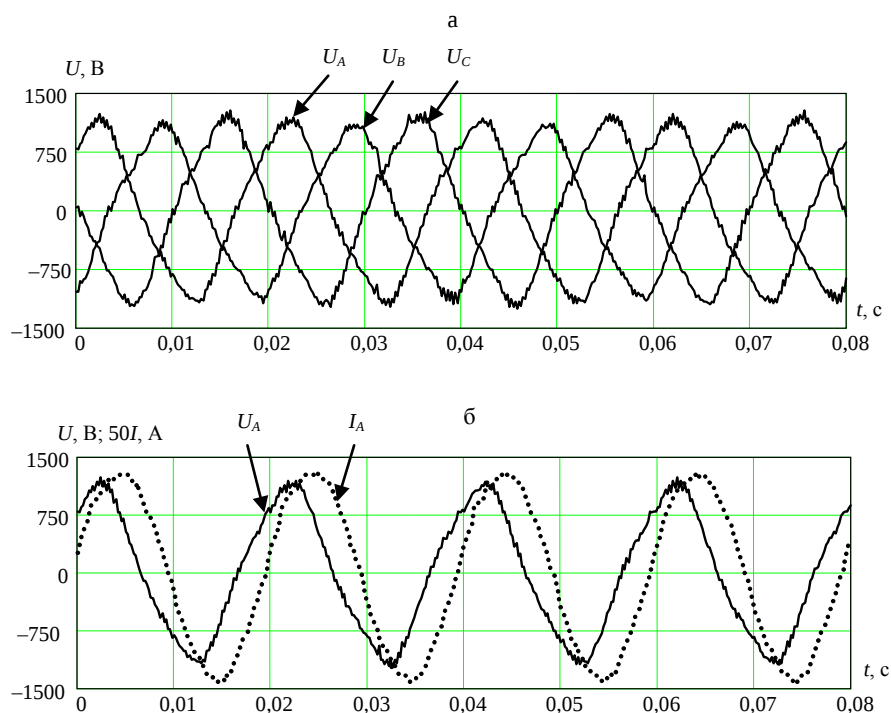


Рис. 3. Осциллограммы: а – фазных напряжений; б – напряжения и тока по фазе А

В результате измерений оказалось, что форма токов по всем фазам ближе к синусоиде, чем форма напряжения. При этом нелинейные искажения формы напряжения возрастают с понижением частоты.

Исследования амплитудно-частотных (АЧХ) и фазочастотных (ФЧХ) характеристик при разложении в ряд Фурье показали, что в спектре высших гармоник напряжения явно преобладает третья гармоническая составляющая, а в спектре тока наблюдается незначительное преобладание второй гармоники, что свидетельствует о некоторой симметрии диаграммы напряжения относительно оси абсцисс и диаграммы тока относительно оси ординат [3].

В табл. 2 приведены значения АЧХ спектра для напряжения фазы А U_A и тока фазы А I_A при разложении в ряд Фурье по синусам для первых

10 гармоник, а также значения коэффициента искажения синусоидальности $K_{нс}$ кривых напряжения и тока (как отношения среднеквадратического значения суммы высших гармоник к первой гармонике).

Таблица 2

АЧХ спектра для напряжения фазы A U_A и тока фазы A I_A

Номер гармоник	Значения амплитуд гармоник при частоте основной гармоники f							
	30 Гц		45 Гц		50 Гц		60 Гц	
	U_A , В	I_A , А	U_A , В	I_A , А	U_A , В	I_A , А	U_A , В	I_A , А
1	640,8	19,8	955,1	24,4	1082	26,7	1251	29,2
2	4,6	0,92	2,0	0,49	1,8	0,47	30,5	1,05
3	66,2	0,47	86,4	0,29	93,4	0,28	105,6	0,32
4	5,4	0,36	5,0	0,36	0,73	0,24	11,2	0,42
5	5,4	0,31	6,6	0,46	11,1	0,47	7,5	0,41
6	0,94	0,02	2,5	0,06	2,2	0,05	10,5	0,19
7	2,11	0,12	1,9	0,06	4,0	0,07	6,2	0,22
8	1,1	0,12	3,1	0,06	2,5	0,1	4,7	0,14
9	0,8	0,08	0,27	0,02	1,9	0,06	1,2	0,13
10	1,9	0,11	0,79	0,1	4,3	0,04	3,7	0,09
$K_{нс}$	0,104	0,059	0,091	0,034	0,088	0,029	0,089	0,035

АЧХ и ФЧХ спектров напряжений и токов позволяют рассчитать входные импедансы по каждой гармонической составляющей. При этом необходимо учитывать направление активной мощности, так как нелинейная нагрузка может быть генератором по некоторым высшим гармоникам [3, с. 455]. Очевидно, если абсолютное значение фазового сдвига между напряжением и током для высшей гармонической составляющей превышает $\pm 90^\circ$, то активная мощность этой составляющей направлена от нагрузки к источнику, т. е. от ПЭД к преобразователю частоты.

Таким образом, расчет импедансов (полных сопротивлений) относительно фазных напряжений, например для фазы A , необходимо вести по формулам:

$$Z_{A,0}^{(k)} = \frac{U_A^{(k)} \exp(j\varphi_{U,A}^{(k)})}{I_A^{(k)} \exp(j\varphi_{I,A}^{(k)})}, \quad (1)$$

если

$$(|\varphi_{U,A}^{(k)} - \varphi_{I,A}^{(k)}| < 90^\circ) \vee (|\varphi_{U,A}^{(k)} - \varphi_{I,A}^{(k)}| > 270^\circ); \quad (2)$$

$$Z_{A,1}^{(k)} = \frac{U_A^{(k)} \exp(j\varphi_{U,A}^{(k)})}{I_A^{(k)} \exp(j(\varphi_{I,A}^{(k)} + 180^\circ))}, \quad (3)$$

если

$$(|\varphi_{U,A}^{(k)} - \varphi_{I,A}^{(k)}| \geq 90^\circ) \wedge (|\varphi_{U,A}^{(k)} - \varphi_{I,A}^{(k)}| \leq 270^\circ), \quad (4)$$

где $Z_{A,0}^{(k)}$, $Z_{A,1}^{(k)}$ – соответственно импедансы k -й гармонической составляющей при направлении активной мощности от преобразователя частоты к ПЭД и от ПЭД к преобразователю частоты; $U_A^{(k)}$, $I_A^{(k)}$ – соответственно значения АЧХ k -й гармонической составляющей напряжения и тока; $\varphi_{U,A}^{(k)}$, $\varphi_{I,A}^{(k)}$ – соответственно значения ФЧХ k -й гармонической составляющей

напряжения и тока; $\vee$ – знак дизъюнкции (логического ИЛИ); $\wedge$ – знак конъюнкции (логического И).

Формулы (2) и (4) позволяют определить направление активной мощности. Если эти условия не выполняются, то расчет импедансов $Z_{A,0}^{(k)}$ или $Z_{A,1}^{(k)}$ не имеет смысла, так как их активные (вещественные) составляющие будут отрицательными. В случае направления активной мощности высшей гармоники от ПЭД к преобразователю частоты в (3) осуществляется дополнительный фазовый сдвиг гармонической составляющей тока на 180° . Расчет для фаз B и C аналогичен.

В табл. 3 и 4 приведены значения входных импедансов по фазам A и B для различных значений частоты основной гармоники напряжения, подаваемого на ПЭД, для первых восьми гармоник при направлении активной мощности от преобразователя частоты к ПЭД ($Z_{A,0}^{(k)}$) и от ПЭД к преобразователю частоты ($Z_{A,1}^{(k)}$).

Таблица 3

Значения входных импедансов по фазе A для первых восьми гармоник

Номер гармоники	Значения импедансов при частоте основной гармоники f			
	45 Гц		50 Гц	
	$Z_{A,0}^{(k)}$, Ом	$Z_{A,1}^{(k)}$, Ом	$Z_{A,0}^{(k)}$, Ом	$Z_{A,1}^{(k)}$, Ом
1	$25 + j30$	–	$28,4 + j28,9$	–
2	–	$3,8 - j1,4$	–	$1,4 - j3,7$
3	–	$9 + j247,6$	–	$285,1 + j185$
4	$5,2 + j12,9$	–	$0,19 - j3,1$	–
5	–	$12,7 + j6,9$	–	$19,6 + j13,5$
6	–	$1,7 - j43,4$	$31,4 - j31,1$	–
7	–	$10,2 - j32,1$	$55,1 + j17,7$	–
8	$33,6 + j34,6$	–	$22,8 + j12,6$	–

Таблица 4

Значения входных импедансов по фазе B для первых восьми гармоник

Номер гармоники	Значения импедансов при частоте основной гармоники f			
	45 Гц		50 Гц	
	$Z_{B,0}^{(k)}$, Ом	$Z_{B,1}^{(k)}$, Ом	$Z_{B,0}^{(k)}$, Ом	$Z_{B,1}^{(k)}$, Ом
1	$27,8 + j30,7$	–	$30,4 + j29$	–
2	$12,6 - j1,8$	–	$3,3 - j1,2$	–
3	$413,8 + j455,6$	–	$264,9 - j1145$	–
4	$20,5 + j13,4$	–	$18 + j14,2$	–
5	–	$8,7 + j15,9$	–	$10,3 + j18,3$
6	$22,9 - j18$	–	$8,5 + j1,3$	–
7	$9,1 + j17,4$	–	–	$43,4 - j54,5$
8	$70,9 + j98,2$	–	$3,3 - j14,1$	–

Приведенные значения импедансов позволяют проанализировать возможные закономерности в смене направления активной мощности по высшим гармоникам, а также наличие резонансных режимов на промежуточных частотах между соответствующими частотами гармонических составляющих.

Из табл. 3 и 4, а также дополнительных расчетов, проведенных авторами, следует, что явная закономерность по направлению активной мощности как по разным фазам, так и по одной фазе, но на разных частотах, от-

существует. Это связано с тем, что реальные напряжения и токи не являются строго периодическими (рис. 3), тогда как при разложении в ряд Фурье они считаются периодическими функциями. Поэтому направление активной мощности по высшим гармоникам носит случайный характер. Главный фактор, по которому необходимо учитывать направление мощности, – это анализ наличия резонансов напряжения на промежуточных частотах между соответствующими гармоническими составляющими. О резонансе свидетельствует смена знака реактивной составляющей импеданса при данном направлении мощности. Так, из табл. 2 для $Z_{A,0}^{(k)}$ на частоте 45 Гц нельзя сделать вывод о резонансе, но на частоте 50 Гц наблюдаются резонансы между 1 и 4, 6 и 7 гармониками. Аналогично можно обнаружить резонансы и при направлении активной мощности на высших гармониках от ПЭД к преобразователю частоты.

Исследования авторов показывают, что резонансные частоты для разных фаз и различных частот основной гармоники – также явление случайное. Следовательно, резонансы в сложной системе, аналогичной рассматриваемой, всегда имеют место. Очевидно, что необходимо различать локальные резонансы, не оказывающие существенного влияния на работу оборудования, и глобальные резонансы (как в высокодобротных цепях), приводящие к аварийным режимам. В первом случае при резонансе напряжений активная составляющая импеданса, зависящая от частоты, емкостей и индуктивностей схемы замещения, достаточно велика, и соответственно входной ток на резонансной частоте мал, перенапряжения отсутствуют, изоляция работает в рамках нормального режима. В случае глобального резонанса напряжений активная составляющая входного импеданса резко снижается, и изоляция подвергается перенапряжениям или перегреву из-за возросшего тока на частоте резонанса. Плюс к этому возможно влияние эффектов длинных линий, феррорезонанса, а также токов, протекающих в броне кабеля.

ВЫВОД

Таким образом, проведенные исследования носят лишь предварительный характер и нуждаются в продолжении. Поставленная задача является многофакторной. Исследуемый кабель находится под влиянием высокой температуры, высокого давления, химически агрессивной среды и высших гармоник напряжения и тока. Для окончательных выводов о влиянии преобразователей частоты на работу изоляции кабеля необходимо привлечь специалистов в области химии, физики, электроники. Измерения необходимо проводить на современном оборудовании, защищенном от влияния внешних помех. Исследования должны быть проведены на большом количестве объектов с целью повышения достоверности результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. М е с е н ж н и к, Я. З. Силовые кабельные линии для погружных электросистем / Я. З. Месенжников, А. А. Осягин. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 240 с.
2. К о с т о л о м о в, Е. М. Результаты работы высоковольтных частотно-регулируемых электроприводов насосных агрегатов перекачки нефти на объектах ОАО «Сургутнефтегаз» / Е. М. Костоломов, С. В. Шибашов. – 23.10.2009; runeft.ru
3. Б е с с о н о в, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи / Л. А. Бессонов. – М.: Высш. шк., 1996. – 638 с.

Представлена кафедрой
электроснабжения

Поступила 16.09.2010