

УДК 621.311

КОНЦЕПЦИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ ПОЛИМЕРНОЙ ИЗОЛЯЦИИ НА ЖИЛУ СВЕРХВЫСОКОВОЛЬТНЫХ КАБЕЛЕЙ

А.А. Щерба¹, чл.-корр. НАН Украины, **А.Д. Подольцев**², докт. техн. наук, **В.М. Золотарев**³, докт. техн. наук

1, 2 – Институт электродинамики НАН Украины,

пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина

3 – 3-д "Южкабель",

ул. Автогенная, 7, Харьков, 61099, Украина

Разработана новая математическая модель для определения оптимальных параметров электродвигателей при движении изолированной жилы кабеля в наклонной линии вулканизации с различными скоростями. Модель учитывает изменения параметров свободно провисающего участка жилы и ее погонного веса. Для анализа переходных процессов электромеханической системы создана численная модель, которая позволяет учитывать влияние внешних возмущений на стабильность режимов вулканизации полимерной изоляции. Представлены новые методы повышения качества изоляции, экструзионно нанесенной на движущуюся жилу. Совокупность разработанных методов составляет новые принципы построения электротехнологических систем для экструзионного нанесения сшиваемой полиэтиленовой изоляции на жилу сверхвысоковольтных кабелей. Библ. 24, рис. 6.

Ключевые слова: математическая модель, электротехнологическая система, сверхвысоковольтный кабель, сшитый полиэтилен, наклонная цепная линия, электропривод, векторное управление.

При производстве кабелей со сшитой полиэтиленовой (СПЭ) изоляцией на все более высокие напряжения неизменно возрастает сложность решения проблемы повышения качества основных их элементов, без чего невозможно сохранять высокие показатели эксплуатационной надежности кабелей. Это связано с увеличением в их изоляции неоднородности электрического поля (ЭП), определяемой взаимной зависимостью напряжения эксплуатации кабеля и характеристик его элементов: СПЭ изоляции, проводящих жилы и экрана и полупроводящих слоев, применяемых для уменьшения возмущений поля в изоляции. Даже в однородной изоляции цилиндрических кабелей поле неоднородно [9], поскольку

$$E_{\Delta} = \frac{U}{(R_1 + \Delta) \ln(R_2/R_1)}$$

Здесь E_{Δ} – напряженность ЭП на расстоянии Δ от поверхности полупроводящего слоя радиусом R_1 между жилой и изоляцией; U – напряжение между жилой и экраном; R_2 – радиус полупроводящего слоя между экраном и изоляцией; причем $R_1 = R_{ж} + \Delta_1$, а $R_2 = R_{э} - \Delta_2$, где $R_{ж}$ и $R_{э}$ – радиусы жилы и экрана, а Δ_1 и Δ_2 – толщины полупроводящих слоев.

Согласно [15, 17] надо учитывать наибольшие локальные напряженности ЭП в изоляции и напряженный объем $V_{но}$, в котором напряженность выше допустимых, но меньше пороговых для данной изоляции значений, определяющийся как

$$V_{но} = \int_V f(E) dV, V_{п.о.} = \int_V f(E) dV$$

где V – расчетный объем изоляции; функция $f(E) = 1$ при $E_1 \leq E \leq E_{max}$ и $f(E) = 0$ при $E < E_1$.

При изготовлении кабелей на высокие напряжения возможно применение вертикальной и наклонной линий нанесения на жилу и вулканизации экструзионной изоляции [6]. На вертикальной линии проще получить высокое качество изоляции, но сложнее реализовать

высокую производительность, пропорциональную длине линии, обслуживать и перенастраивать ее для производства кабелей на другие напряжения и токи.

Поэтому в работе выбрана наклонная линия, которая является более производительной и дешевой, проще в обслуживании и перенастройке при производстве кабелей на разные напряжения и токи. Но при такой схеме сложно устранять смещения изоляции относительно жилы. Поэтому *целью данной работы* были анализ и обоснование методов, обеспечивающих режимы термообработки изоляции и линейного перемещения жилы, а также производство изоляции высокого качества.

Для достижения цели надо решить проблему исключения поперечного (радиального) и продольного (осевого) смещений изоляции относительно жилы, возникающих при изменении ее натяжения и скорости движения, в частности, при провалах питающего напряжения. При экструзионном нанесении на движущуюся жилу кабелей трехслойной полимерной изоляции и ее вулканизации невозможно одновременно анализировать установившиеся и переходные процессы перемещения жилы и обеспечивать высокую стабилизацию скорости такого перемещения при провалах напряжения питающей сети более 10 %. Поэтому моделирование и анализ режимов движущейся жилы с изоляцией выполнялись в два этапа.

На первом этапе разрабатывалась математическая модель для свободно провисающей жилы, движущейся с постоянной скоростью в наклонной вулканизационной камере. На такой модели определялись конфигурация и натяжения жилы в камере и необходимые параметры электродвигателей. Затем определялись и допустимые поперечные и продольные отклонения жилы с изоляцией, движущейся в вулканизационной камере, а соответственно поперечные и продольные ускорения жилы.

Полученные результаты использовались на втором этапе в качестве исходных данных для численного моделирования динамических процессов электромеханической системы наклонной линии, включающей два регулируемых электропривода и движущуюся металлическую жилу с изоляцией. На численной модели, созданной с применением пакета программ Matlab/Simulink [2, 4, 7, 12, 13], анализировались переходные режимы, возникающие в такой системе при изменениях погонного веса жилы, ее натяжения и скорости перемещения, а также при кратковременных изменениях напряжения питания электроприводов [5–7].

Модель наклонного участка жилы, движущейся с постоянной скоростью. Форму и характеристики указанного участка жилы можно определить, используя уравнение наклонной цепной линии [3, 11], форма которой изменяется при разных натяжениях в верхней и нижней точках свободно провисающей цепи, как показано на рис. 1.

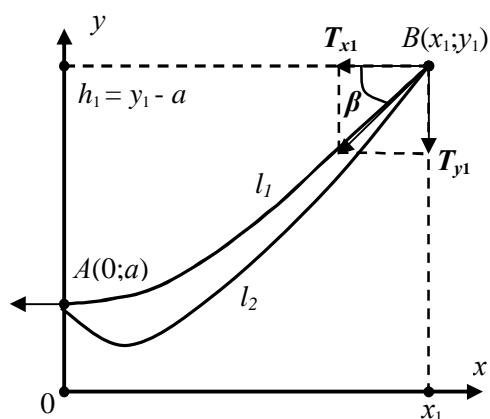


Рис. 1

и нижней точках свободно провисающей цепи, как показано на рис. 1.

Если систему координат xoy (см. рис. 1) выбрать так, чтобы самая нижняя точка наклонного участка жилы имела координаты точки $A(0;a)$, где величина a является характерным параметром формы цепной линии, то самая верхняя точка этого участка жилы будет иметь координаты точки $B(x_1;y_1)$.

Из многочисленных расчетов и экспериментов был выбран угол наклона свободно провисающей жилы с горизонтальной осью системы координат, который на рис. 1 представлен как угол β . Если в точке B обозначить полное натяжение жилы T , тогда его горизонтальная и вертикальная составляющие натяжения будут равны $T_{x1} = T \cdot \cos \beta$ и $T_{y1} = T \cdot \sin \beta$. Оптимальным провисанием жилы признавалось такое провисание, при котором ее натяжение в точке $A(0;a)$ имело только горизонтальную составляющую $T_x = T_{x1}$, а его вертикальная составляющая T_y отсутствовала, то есть $T_y = 0$.

Обоснование необходимых условий равномерного движения такой наклонной свободно провисающей жилы, то есть определение ее формы и расчета сил натяжения жилы в верхней и нижней точках, состояло в следующем. Из требуемой пропускной мощности кабеля $S = UI$

определялись величины напряжения U на изоляции кабеля и тока I в его жиле. Из допустимой средней плотности тока определялось поперечное сечение жилы, причем при сечении больше 1000 мм^2 выбирались жилы с изолированными сегментами по типу конструкции "Милликен" [23], в которой учитывались эффекты вытеснения тока на поверхность и взаимодействия токов, протекающих в близко расположенных изолированных сегментах [14].

Исходя из заданного напряжения, выбранных сечения и качества поверхности жилы, толщины и свойств полупроводящих полимерных слоев и прогнозируемого качества изоляции определялась ее толщина. Выбрав материал жилы (электротехнические алюминий или медь) и задавшись ее погонной массой (то есть массой жилы длиной 1 м), а также массой полупроводящих слоев и изоляции, определим общий погонный вес жилы с изоляцией как

$$P' = (m_{\text{ж}} + m_{\text{из.}}) g / l_1, \quad (1)$$

где $m_{\text{ж}}$ – масса всей длины жилы; $m_{\text{из.}}$ – общая масса изоляции и полупроводящих слоев; g – ускорение свободного падения в условиях притяжения Земли; l_1 – общая длина участка провисающей жилы, определяемая как $l_1 = V \times \Delta t$ (где V – скорость движения жилы, Δt – необходимое время для вулканизации термосшиваемой полиэтиленовой изоляции).

Из требуемого качества изоляции и опыта ее нанесения на жилу определен угол наклона вулканизационной камеры β к оси OX . Если начало координат выбрать как на рис 1, то параметр формы цепной линии можно определить как $a = T_x / P'$ (где T_x – горизонтальное натяжение свободно провисающей жилы в нижней ее точке, а P' – погонный вес жилы с изоляцией). Введя необходимое преобразование координат в выражение для уравнения цепной линии, приведенное в [3, 11], его можно упростить и записать в виде

$$y(x) = a + h = a \operatorname{ch} x/a, \quad (2)$$

где y и x – текущие горизонтальная и вертикальная координаты провисающей части жилы, а h – разность высоты между ее верхней и нижней точками.

Оптимальная форма провисания жилы с изоляцией, координаты верхней точки и необходимое натяжения жилы должны быть такими, чтобы в нижней точке $A(0;a)$ натяжение имело только горизонтальную составляющую, а вертикальная равнялась нулю. Если натяжение жилы будет меньше, тогда ее провисание будет иметь форму, представленную кривой l_2 на рис. 1, что недопустимо из-за увеличения смещения жидкой изоляции по жиле и возможного повреждения поверхности изоляции из-за ее соприкосновения с нижней поверхностью вулканизационной камеры. Если натяжение жилы будет больше оптимального T_x , то может возникнуть аналогичное соприкосновение изоляции с верхней поверхностью камеры.

Выбранные допущения и указанное задание системы координат для цепной линии позволяет представить уравнение (2) в виде

$$l = a \operatorname{sh} x/a. \quad (3)$$

Из уравнения (3) для верхней точки $B(x_1; y_1)$ на рис. 1 можно записать следующее:

$$a = l_1 / \operatorname{sh} x/a = l_1 / \operatorname{tg} \beta. \quad (4)$$

Тогда при $l_1 = 55,45$ м и $\beta = 23,1^\circ$ получим, что параметр $a = 130$ м, а координату x_1 можно определить из уравнения (3). Для нее получим выражение

$$x_1 = a \operatorname{arc} \operatorname{sh} l_1 / a, \quad (5)$$

или

$$x_1 = a \ln \{ l_1 / a + [(l_1 / a)^2 + 1]^{1/2} \}.$$

При $a = 130$ м и $l_1 \approx 55,45$ м из уравнения (5) получим $x_1 = 53,89$ м.

Учитывая, что

$$h_1 = y_1(x_1) - a = 11,33 \text{ м}$$

и

$$dy/dx = \operatorname{sh} x/a = T_y / T, \quad (6)$$

при $x = 0$ из уравнения (2) получим $y = a$. Тогда согласно выражению (6) получим

$$T_y = 0 \text{ и } T_{\text{общ.}} = T_x.$$

Если погонный вес жилы с изоляцией составляет $P' \leq 270$ Н/м, то тогда

$$T_x = a P' \geq 34,4 \text{ кН} . \quad (7)$$

Согласно соотношению (7) можно определить оптимальное натяжение жилы в самой нижней точке наклонного участка – точке $A(0; a)$, что позволило определить оптимальные силовые параметры электродвигателя, создающего указанное натяжение. Было показано, что для регулирования скорости движения жилы v_1 от 0,5 до 50 м/мин тяговое усилие $T_{1\max}$ этого двигателя должно изменяться: при $v_1 \leq 10$ м/мин оно должно быть равно 45 кН, при $10 \text{ м/мин} < v_1 \leq 20 \text{ м/мин}$ – $T_{2\max} = 22,5$ кН, а при $20 \text{ м/мин} < v_1 < 50 \text{ м/мин}$ – 8 кН.

Параметры электродвигателя, создающего натяжение жилы в точке $B(x_1, y_1)$, можно определить из условия, что в этой точке справедливо соотношение $T_{\max} = T_x / \cos \alpha_1 \geq 37,4$ кН.

Изменяя значения x_1 и y_1 , можно определить необходимые натяжения T_x и T_{\max} , параметры и конфигурацию наклонного участка жилы при разных его длине и высоте, погонном весе и при движении жилы с различными неизменными скоростями. То есть можно определять параметры электродвигателей для реализации горизонтального натяжения жилы в нижней точке и ее максимального натяжения возле экструдера при переходе электромеханической системы из одного установившегося режима в другой. В работе параметры двигателей выбирались такими, чтобы жилу можно было перемещать со скоростями от 0,3 до 50 м/мин.

Задача исключения смещения трехслойной изоляции относительно центра жилы была решена за счет применения трех новых методов:

- 1) высокочастотного индукционного подогрева жилы до температуры 80°C независимо от температуры внешней среды;
- 2) введения дополнительной зоны термообработки трехслойной изоляции – зоны ее охлаждения до твердого состояния сразу после экструзии;
- 3) подкручивания жилы со скоростью до 1 оборота на 30 м ее длины.

Особенностью индукционного подогрева жилы, непрерывно движущейся со скоростью 0,3...50 м/мин в трехсекционном проходном индукторе, в обмотках которого возбуждались токи частотой 500...2400 Гц, была необходимость учета поверхностного эффекта в обмотках индуктора и в изолированных сегментах металлической жилы типа "Милликен" и выбора режимов нагрева, при которых на участках поверхности сегментов с большой кривизной не возникало бы температур более 250°C , критичных для полимерной изоляции между сегментами. Такая задача решена в работе [14], где был выбран режим индукционного нагрева, при котором температура жилы перед экструзионным нанесением на нее изоляции всегда была равной 80°C независимо от температуры внешней среды. Это исключило влияние внешней среды на температурные режимы одновременного экструзионного наложения на движущуюся жилу трех слоев полимерной изоляции – двух полупроводящих и одного диэлектрического между ними. Расчет электромагнитного поля и нагрева сегментной жилы проводился с применением пакета прикладных программ Comsol Multiphysics [20]. На основании полученных результатов определены требования к индукторам, их источнику электропитания и блоку управления с учетом необходимого изменения скорости перемещения жилы в камере вулканизации изоляции более чем в 6 раз.

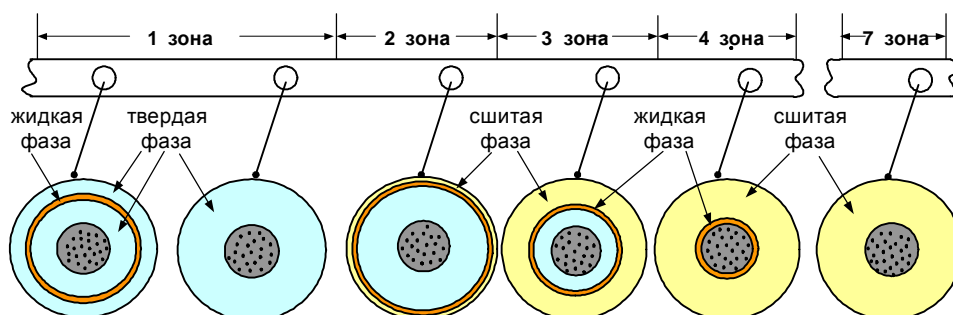


Рис. 2

Второй метод уменьшения смещения изоляции относительно жилы основан на ее охлаждении до отверждения сразу после экструзионного нанесения на жилу, что существенно уменьшает дальнейшее смещение изоляции относительно жилы. Такой метод отражен на рис. 2, где показаны охлаждение и полное отверждение изоляции в первой зоне вулканизационной камеры, а затем разогрев и ее полное сшивание в следующих зонах [5, 6].

На рис. 3 показаны кривые, отражающие изменения температур: на поверхности изоляции ($T_{ни}$), в ее центре ($T_{ци}$) и на поверхности жилы ($T_{пж}$), а также процента сшивки изоляции (% сш) по мере ее перемещения вместе с жилой внутри наклонной вулканизационной камеры. В первой зоне камеры (см. 1 зона на рис. 3), где изоляцию охлаждают до полного отверждения,

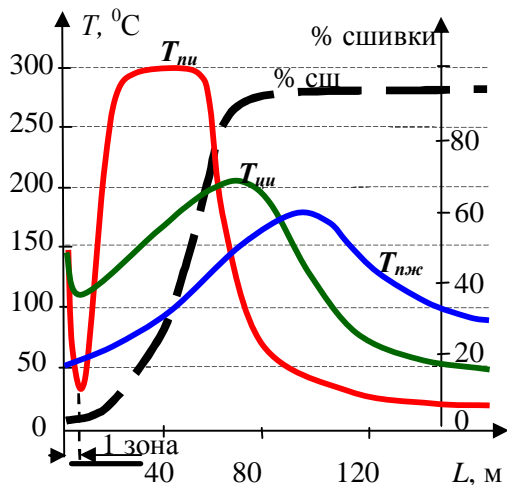


Рис. 3

ее сшивка (по сути, наноструктурное термоупрочнение) протекает достаточно медленно, а по мере подогрева изоляции в последующих зонах возрастает. При выходе изоляции из вулканизационной камеры процесс сшивки СПЭ изоляции является практически завершенным.

Отметим, что наши зависимости имеют некоторые отличия от аналогичных зависимостей, приведенных в работе [6], что показывает наличие нескольких экстремальных областей в исследуемом многомерном пространстве. Наиболее значимой из них следует признавать ту, в которой реализуются наиболее высокие эксплуатационные характеристики СПЭ изоляции.

При необходимости дополнительно уменьшить осевое смещение изоляции относительно жилы возможно за счет ее подкручивания. В созданной на ЗАО "Завод "Южкабель" (г. Харьков) системе для нанесения СПЭ изоляции на жилу сверхвысоковольтных кабелей такое подкручивание осуществляется со скоростью до 1 оборота на 30 м длины жилы.

Исследование переходных процессов в электромеханической системе, регулирующей движение жилы с изоляцией, проводилось на математической модели, которая использует пакет прикладных программ Matlab/Simulink, имеющей специальные блоки и примеры построения систем автоматизированного электропривода. Методы исследования на таких моделях приведены в [2, 7, 12, 13]. В работе проводился анализ критических режимов исследуемой системы, в частности, при провалах питающего напряжения более 10 %, что обычно недопустимо при работе частотно-регулируемых электроприводов, и исследование переходных процессов при исчезновении питающего напряжения и изменении сил торможения жилы.

Математическая модель создавалась для электромеханической системы, состоящей из двух электроприводов на базе асинхронных двигателей с векторным управлением движения жилы. Структурная схема такой системы изображена на рис. 4.

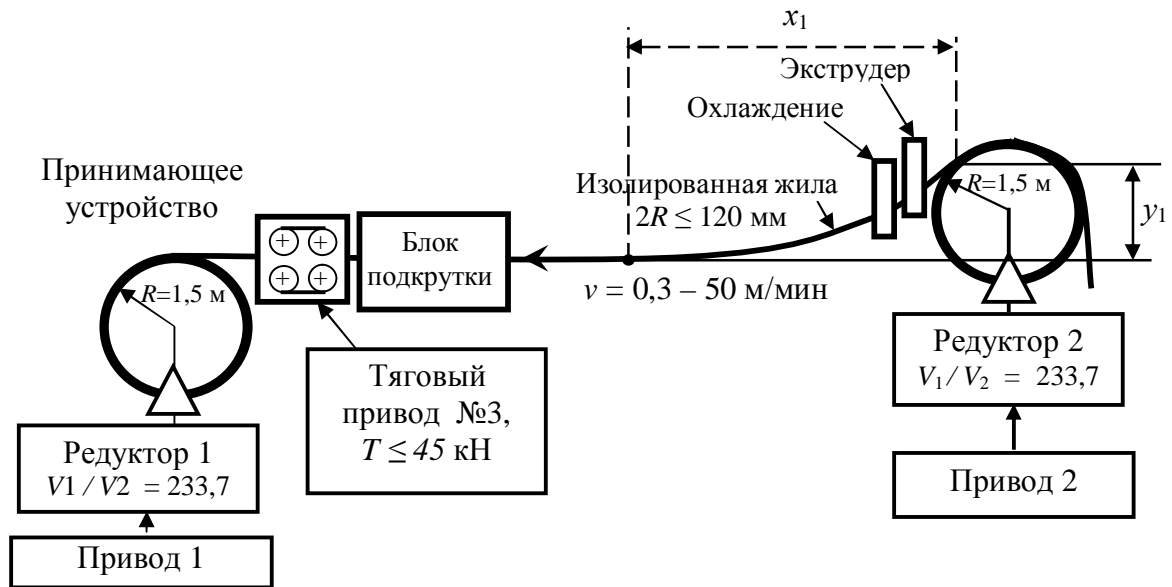


Рис. 4

Математическая модель асинхронного двигателя состояла из двух частей – электрической модели четвертого порядка и механической модели, являющейся системой второго порядка. Все электрические переменные и параметры машины приводились к статору. Исходные уравнения электрической части машины записывались для двухфазной системы координат (оси d - q) и имели вид [7]

$$\begin{aligned}
 V_{qs} &= R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} \varphi_{qs} - \omega \varphi_{ds}; & V_{ds} &= R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \varphi_{ds} - \omega \varphi_{qs}; \\
 V'_{qr} &= R'_r i'_{qr} + \frac{d}{dt} \varphi'_{qr} + (\omega - \omega_r) \varphi'_{dr}; & V'_{dr} &= R'_r i'_{dr} + \frac{d}{dt} \varphi'_{dr} - (\omega - \omega_r) \varphi'_{qr}; \\
 T_e &= 1,5 (\varphi_{ds} i_{ds} - \varphi_{qs} i_{ds}),
 \end{aligned}$$

где $\varphi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i'_{qr}$, $\varphi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i'_{dr}$, $\varphi'_{qr} = L'_r i'_{qr} + L_m i_{qs}$, $\varphi'_{dr} = L'_r i'_{dr} + L_m i_{ds}$, $L_s = L_{ls} + L_m$; $L'_r = L'_{lr} + L_m$.

Механическая часть машины описывалась двумя уравнениями: $\frac{d}{dt} \omega = \frac{1}{J} (T_e - F\omega - T_m)$,

и $\frac{d}{dt} \theta = \omega$, где R_s, L_{ls} – сопротивление и индуктивность рассеяния статора; R'_r, L'_{lr} – сопротивление и индуктивность рассеяния ротора; L_m – индуктивность цепи намагничивания; L_s, L'_r – полные индуктивности статора и ротора; V_{qs}, i_{qs} – проекции напряжения и тока статора на ось q ; V'_{qr}, i'_{qr} – проекции напряжения и тока ротора на ось q ; V_{ds}, i_{ds} – проекции напряжения и тока статора на ось d ; V'_{dr}, i'_{dr} – проекции напряжения и тока ротора на ось d ; $\varphi_{ds}, \varphi_{qs}$ – проекции потокосцепления статора на оси d и q ; $\varphi'_{dr}, \varphi'_{qr}$ – проекции потокосцепления ротора на оси d и q ; ω – угловая скорость ротора; θ – угловое положение ротора; J – момент инерции ротора; T_e – электромагнитный момент двигателя; T_m – статический момент нагрузки; F – коэффициент трения (все обозначения соответствуют обозначениям, принятым в пакете Matlab/Simulink).

В модели использовались паспортные данные электродвигателя с короткозамкнутым ротором номинальной мощностью 90 кВт и частотой вращения 978 об/мин. Для реализации тормозных режимов использовался специальный блок *ВСН*, имеющий тормозной резистор, на котором выделялась энергия при динамическом торможении. Частота коммутации резистора обеспечивалась пропорциональным регулятором через *IGBT*-ключ. Подсистема *Sub_3* выделяла сигналы заданной и фактической скоростей, а также электромагнитного момента двигателя и момента нагрузки. Электропитание двигателя осуществлялось от трехфазной промышленной сети с использованием трехфазного выпрямителя и инвертора с широтно-импульсной модуляцией, что позволяло обеспечивать широкодиапазонное регулирование

механическими параметрами электропривода в соответствии с электротехнологическими требованиями. Динамические процессы, протекающие в рассматриваемой системе электропривода, контролировались осциллографом Scope1.

Реализуемая в работе скоростная диаграмма показала высокую точность обработки электромеханической системой заданной скорости во всем диапазоне регулирования скорости движения изолированной токопроводящей жилы, кроме начального участка разгона, что связано с необходимостью преодоления пассивного момента нагрузки. Диаграмма моментов подтвердила постоянный характер нагрузки, а также выполнение основного уравнения движения электропривода при затухающих колебаниях на участках запуска и торможения. Наличие колебаний в кривой момента предопределялось самой структурой системы управления, в которой отсутствовал канал регулирования тока (момента).

К основным энергетическим характеристикам электропривода относятся зависимости активной, реактивной и полной потребляемой мощностей от мощности нагрузки на валу двигателя: $P, Q, S = f(P_2)$. Эти характеристики позволяют определить еще два важных показателя: КПД (KPD) – $\eta = P_2/P$ и коэффициент мощности (Ks) – $\cos \varphi = P/S$. Диаграмма мощностей всей системы показала небольшое значение реактивной мощности, поэтому кривые полной и активной мощностей практически совпадали. С применением указанной математической модели возможно получение фазовых траекторий энергетических характеристик системы электропривода в целом и для асинхронного двигателя в отдельности. Типичным для всех характеристик являлось наличие петли, что соответствовало двум разным режимам работы электропривода: запуску и торможению. Исследуемые характеристики имели практически линейный характер, что подтверждало теоретические расчеты при проектировании электродвигателей.

Обычно в частотно-автоматизированном электроприводе с векторно-управляемыми асинхронными электродвигателями допускаются изменения питающего напряжения не более $\pm 10\%$, при превышении которых электропривод отключается [1, 8, 10, 12, 16, 18–24]. Учитывая состояние электросетей в Украине ЗАО "Завод "Южкбель" заказывал фирме Siemens разработку специализированного электропривода с векторно-управляемыми электродвигателями, позволяющими работать при изменении напряжения питания в более широком диапазоне. Моделирование режимов такого электропривода подтвердило высокую стабильность его параметров при уменьшении питающего напряжения на 20% (см. рис. 5). При этом величина угловой скорости вращения ротора изменялась не более чем на 2%.

При этом было показано, что если напряжение питания электропривода уменьшится на 27% и более в течение времени, равного 0,2 с, то скорость вращения ротора начнет существенно изменяться (см. рис. 6). Это будет соответственно вызывать изменение скорости линейного перемещения жилы с изоляцией в наклонной вулканизационной камере.

Приведенные исследования переходных электрических и механических процессов в системе электроприводов для регулирования скорости движения жилы в наклонной вулканизационной камере позволили уточнить допустимые возмущения в созданной электромеханической

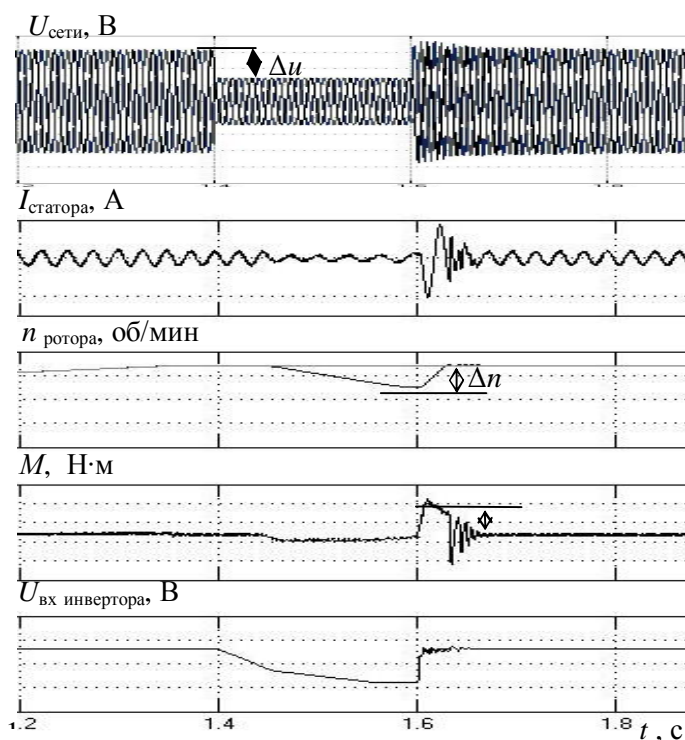


Рис. 5

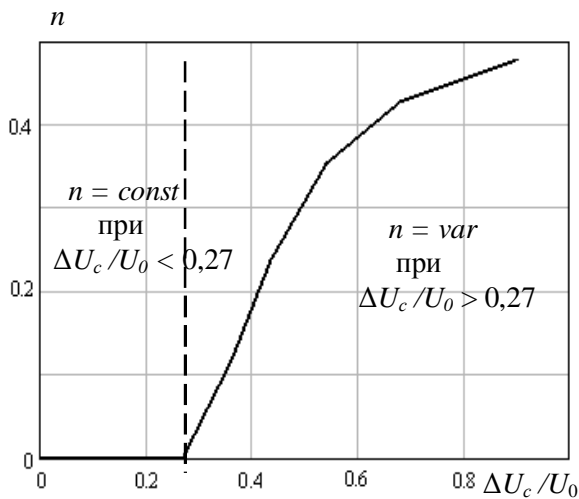


Рис. 6

ской системе с векторно-управляемыми электродвигателями, при которых такая система исключает колебания движущейся жилы как в радиальном, так и осевом направлениях.

Полученные в результате моделирования данные использованы при создании электротехнологической системы нанесения СПЭ изоляции на жилу сверхвысоковольтных кабелей. В состав такой системы вошли следующие установки, системы и блоки:

- система силового электропитания мощностью более 1 МВА;
- система дозирования компонентов, обеспечивающая пневматическую подачу необходимых компонентов изоляции в ре-

жиме, исключающем попадание каких-либо примесей;

- система электроподогрева азота, состоящая из 7 блоков мощностью по 50 кВт для контактного электроподогрева части вулканизационной камеры длиной более 40 м;
- система электропитания и охлаждения азотом, обеспечивающая непрерывную подачу в вулканизационную камеру промышленного азота для охлаждения изоляции и исключения влияния на процессы ее сшивания внешней среды;
- система охлаждения водой и воздухом, которая вместе с системами подогрева, подачи и охлаждения азотом обеспечивает оптимальный режим вулканизации и охлаждения полимерных слоев на токопроводящей жиле до температуры цеха;
- система удаления побочных компонентов в специальные закрытые емкости, которая обеспечивает экологическую чистоту производства;
- система контроля наиболее важных электрических и технологических параметров, которая обрабатывает и передает собранную информацию в систему управления технологическими режимами нанесения изоляции на движущуюся жилу.

Основными контролируемыми параметрами являются:

- температура жилы на входе во встроенную экструзионную головку, на основании которой регулируется необходимое количество тепла $Q_{ж}$ при данной скорости движения жилы;
- постоянная температура экструзионной головки, по которой регулируется количество тепла $Q_э$, необходимое для окончательного подогрева в ней уже расплавленных компонентов СПЭ изоляции, поступающих от трех непрерывно работающих экструдеров;
- наибольшее постоянное давление $P_э$ расплавленной смеси на выходе экструзионной головки, по которому регулируется подача расплавленной изоляции экструдерами;
- диаметр D_k металлической жилы с трехслойной изоляцией и ее эксцентриситет, которые измеряют с помощью блока рентген-контроля толщины всех трех полимерных слоев;
- температура вулканизации $T_э$ в каждой из термозон, регулирование которой необходимо для реализации наиболее эффективного режима вулканизации;
- давление азотной среды $P_э$ в вулканизационной камере;
- сигнал от блока электромагнитного контроля положения жилы относительно оси наклонной вулканизационной камеры;
- другие аналоговые и цифровые сигналы систем обеспечения работоспособности и безопасности функционирования электротехнологической системы.

Согласно изложенному следуют выводы:

1. В работе представлена новая концепция разработки электротехнологических систем для нанесения сшиваемой полимерной изоляции на жилу сверхвысоковольтных кабелей. Для реализации концепции разработаны новые методы вулканизации трехслойной полимер-

ной изоляции на движущейся жиле, а также оптимизации натяжения и скорости движения жилы в наклонной вулканизационной камере при возмущениях в системе.

2. Новая концепция основывается:

– на разработке математической модели для исследования условий реализации оптимальной конфигурации наклонного свободно провисающего участка движущейся металлической жилы с полимерной изоляцией;

– определении параметров и характеристик электроприводов для создания оптимальных натяжений жилы на всех участках вулканизационной камеры, с учетом ее конфигурации и возможных изменений скорости движения жилы, ее поперечного сечения и толщины трех слоев полимерной изоляции;

– компьютерной реализации Simulink-модели для анализа переходных электрических и механических процессов (в частности, колебаний наклонного свободно провисающего участка жилы в радиальном и осевом направлениях) в электромеханической системе с векторно-управляемыми электродвигателями с учетом изменений параметров движущейся жилы, тормозящих сил и напряжения электропитания;

- индукционном подогреве жилы до заданной температуры перед нанесением изоляции, охлаждении изоляции до полного отверждения сразу после ее экструзионного нанесения на жилу и введении низкочастотного вращения жилы в вулканизационной камере;

- автоматическом регулировании натяжения и скорости движения жилы для реализации оптимальной конфигурации ее провисающего участка при изменении параметров: жилы, электромеханической системы, тормозящих устройств и напряжения электропитания;

- контроле и регулировании осесимметричности каждого слоя изоляции и температуры ее термообработки в каждой зоне вулканизирующей камеры.

3. Реализован метод нанесения трехслойной полимерной изоляции на жилу, учитывающий взаимную зависимость напряжения на кабеле и параметров его элементов: СПЭ изоляции, полупроводящих слоев, жилы и экрана.

4. Разработана методика расчета конфигурации и параметров электротехнологической системы, состоящей из камеры вулканизации трехслойной полимерной изоляции, нанесенной на свободно провисающую наклонную движущуюся металлическую жилу, и системы регулируемых электроприводов.

5. На основании Simulink-модели создана методика анализа пусковых, переходных и аварийных режимов в вулканизационных установках наклонного типа (в частности, при изменении параметров изолированной жилы, тормозящих устройств и напряжения электропитания) для регулирования динамических характеристик движущейся жилы.

Практически сведено к минимуму смещение экструзионной изоляции на наклонной движущейся жиле как в радиальном, так и осевом направлениях за счет быстрого ее охлаждения до твердого состояния после экструзии и высокой устойчивости электромеханической системы регулирования движения жилы при провалах напряжения электропитания.

1. *Браславский И.Я., Ишиматов З.Ш., Барац Е.И.* Адаптивная система прямого управления моментом асинхронного двигателя // *Электротехника*. – 2001. – № 11. – С. 35–39.
2. *Герман-Галкин С.Г.* Matlab/Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. – С.-Пб.: КОРОНА-Век, 2008. – 368 с.
3. *Зельдович Я.Б., Мьшкин А.Д.* Элементы прикладной математики. – М.: Наука, 1967. – 480 с.
4. *Золотарев В.М., Щерба А.А., Подольцев А.Д.* Моделирование динамических процессов в электромеханическом комплексе для обеспечения требуемого движения силового кабеля с полиэтиленовой изоляцией в наклонной экструзионной линии // *Техн. электродинамика*. – 2010. – № 3. – С. 44–51.
5. *Золотарьев В.В., Карпушенко В.П., Науменко О.А., Золотарьев В.М.* Основні закономірності роботи похилої екструзійної лінії для виготовлення силових кабелів на напругу до 330 кВ та їх заводських випробовувань // *Вісн. Нац. техн. ун-ту "Харківський політехнічний інститут"*. – 2008. – № 44. – С. 44–52.
6. *Леппанен Й., Чамов А.В.* Производство сверхвысоковольтных кабелей на наклонных и вертикальных линиях вулканизации компании Майллерфер // *Кабели и провода*. – 2009. – № 1 (314). – С. 16–18.
7. *Описание приложения SimPowerSystems*. – www.mathworks.com.

8. *Пересада С.М.* Нелинейное и адаптивное управление в электромеханических системах с векторно-управляемыми электродвигателями: Дис... докт. техн. наук / НАН Украины, Ин-т электродинамики. – Киев, 2007. – 472 с.
9. *Уиди Б.* Кабельные линии высокого напряжения. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 728 с.
10. *Усольцев А.А.* Векторное управление асинхронными двигателями / Учеб. пособие. – С.-Пб.: Гос. ин-т точной механики и оптики (Техн. ун-т), 2002. – 43 с.
11. *Холодный С.Д., Марченко Д.А.* Расчет усилия натяжения кабельного изделия в вулканизационной камере наклонной кабельной линии непрерывной вулканизации // Кабели и провода. – 2009. – № 3 (316). – С. 10–11.
12. *Чермалых В.М., Чермалых А.В., Майданский И.Я.* Исследование динамики и энергетических показателей асинхронного электропривода с векторным управлением методом виртуального моделирования // Вісн. Нац. техн. ун-ту "ХПІ". – Харків: НТУ «ХПІ», 2008. – № 30. – С. 41–45.
13. *Черных И.В.* Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс, Питер, 2008. – 288 с.
14. *Шидловский А.К., Щерба А.А., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н., Золотарев В.М.* Анализ электромагнитных процессов и эквивалентных параметров сегментированных токопроводящих жил силовых кабелей на напряжение 330 кВ // Техн. електродинаміка. – 2008. – № 6. – С. 7–13.
15. *Шидловский А.К., Шумилов Ю.Н., Щерба А.А., Золотарев В.М.* Высоковольтные полимерные изоляторы. – К.: Сучасність, 2008. – 253 с.
16. *Шрейнер Р.Т., Дмитренко Ю.А.* Оптимальное частотное управление асинхронными электроприводами. – Кишинев: Штиинца, 1982. – 224 с.
17. *Щерба А.А., Перетятко Ю.В., Золотарев В.М.* Моделирование электрических полей и расчет объемов с критической напряженностью в полимерной изоляции высоковольтных кабелей и СИП // Техн. електродинаміка. Темат. вип. "Проблеми сучасної електротехніки". – 2008. – Ч. 2. – С. 113–118.
18. *Эпштейн И.И.* Автоматизированный электропривод переменного тока. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 192 с.
19. *Bose V.K.* Power Electronics and Motor Drives. Elsevier, 2006. – 917 p.
20. *Comsol Multiphysics 3.5. User's Guide and introduction.* - Comsol, Inc. – www.comsol.com
21. *Krause P.C., Wasynczuk O., Scott D.S.* Analysis of Electric Machinery and Drive Systems. Wiley-Interscience, 2002. – 632 p.
22. *Nash J.N.* Direct Torque Control, Induction Motor Vector Control Without an Encoder // IEEE Trans. Industry Applications. – 1997. – V.33. – № 2. – Pp. 333–341.
23. *Patent USA, US № 475094* Electrical Cable / H. Milliken; Patent Publication 1933.
24. *Trzynadlowski A.* Control of Induction Motors. Academic Press, 2001. – 225 p.

УДК 621.311

А.А. Щерба¹, чл.-кор. НАН України, **О.Д. Подольцев²**, докт. техн. наук, **В.М. Золотарев³**, докт. техн. наук

1, 2 – Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

3 – З-д "Південкабель",

вул. Автогенна, 7, Харків, 61099, Україна

Концепція електротехнологічних систем для нанесення полімерної ізоляції на жилу надвисоковольтних кабелів

Розроблена нова математична модель для визначення оптимальних параметрів електродвигунів при русі ізолюваної жили кабелю в похилій лінії вулканизації з різними швидкостями. Модель враховує зміни параметрів вільно провисаючої ділянки жили і її погонної ваги. Для аналізу перехідних процесів електромеханічної системи створена чисельна модель, яка дозволяє враховувати вплив зовнішніх збурень на стабільність режимів вулканизації полімерної ізоляції. Представлені нові методи підвищення якості ізоляції, екструзійно нанесеної на рухому жилу. Сукупність розроблених методів складає нові принципи побудови електротехнологічних систем для екструзійного нанесення зшиваної поліетиленової ізоляції на жилу надвисоковольтних кабелів. Бібл. 24, рис. 6.

Ключові слова: математична модель, електротехнологічна система, надвисоковольтний кабель, зшитий поліетилен, похила ланцюгова лінія, електропривод, векторне управління.

A.A. Shcherba¹, O.D. Podoltsev², V.M. Zolotaryov³,

1–5 – Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,

Peremogy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

3 – Factory "Yuzhicable",

str. Avtogenneya, 7, Kharkov, 61099, Ukraine

Conception of electrotechnological systems for coating of polymeric insulation on conductor of super voltage cables

A new mathematical model for determination of optimal parameters of electric motors at moving of the isolated conductor of cable in the slanting line of vulcanization with different speeds is developed. A model takes into account the changes of parameters of freely

sagging area of conductor and its running weight. For the analysis of transient processes of the electromechanical system a numeral model which allows taking into account influence of external distortions on stability of the modes of vulcanization of polymeric insulation is created. New methods of upgrading insulation which is coated on moving conductor by extrusion are represented. The assemblage of the developed methods represents new principles of construction of the electro-technological systems for extrusion coating of cross-linkable polyethylene insulation on conductor of super voltage cables. References 24, figures 6.

Key words: mathematical model, electromechanical system, super voltage cable, cross-linked polyethylene, slanting catenary line, electric drive, vector control.

Надійшла 31.05.2011

Received 31.05.2011