

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ВЫБОРА ПОЛИМЕРОВ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫХ ДЕТАЛЕЙ

Д.т.н. А. М. Синотин, к.т.н. Ю. Н. Александров, к.т.н. С. В. Сотник

Харьковский национальный университет радиоэлектроники

Основной целью работы является алгоритм выбора полимеров при изготовлении электроизоляционных деталей. В работе проведено обобщение результатов исследований в области применения полимеров как электроизоляционного материала. Рассмотрены основные параметры электроизоляционных деталей. Характеристики и рекомендации по применению полимеров в приборостроении. В результате предложен алгоритм выбора полимера при изготовлении электроизоляционных деталей, который позволяет найти рациональный материал. Свойства выбранного полимера необходимо учитывать при проектировании формирующего инструмента для получения качественной полимерной детали.

Основною метою роботи є алгоритм вибору полімерів при виготовленні електроізоляційних деталей. В роботі проведено узагальнення результатів досліджень в області застосування полімерів як електроізоляційного матеріалу. Розглянуто основні параметри електричних деталей. Характеристики та рекомендації щодо застосування полімерів в приладобудуванні. В результаті запропоновано алгоритм вибору полімеру при виготовленні електроізоляційних деталей, який дозволяє знайти раціональний матеріал. Властивості обраного полімеру необхідно враховувати при проектуванні формируючого інструмента для отримання якісної полімерної деталі.

The main goal of work is polymer selection algorithm in manufacture of electrical insulating parts. The paper summarizes results of research in field of polymers use as an insulating material. The main parameters of electrical insulating parts are considered. Characteristics and recommendations for use of polymers in instrumentation. As a result, algorithm is proposed for choosing a polymer in the manufacture of electrical insulating parts, which allows one to find a rational material. The properties of selected polymer must be considered when designing forming tool to obtain a high-quality polymer part.

Ключевые слова: полимеры, электроизоляционные, детали, электрические, приборы

Введение

Полимеры (ПМ) являются важнейшим конструкционным материалом современной техники. Такие материалы, используемые во всех отраслях промышленности, а их степень применения растет с каждым днем.

Одной из тенденций промышленного производства наряду с металлами и сплавами, в промышленности находят применение ПМ. Изделия из полимеров обычно изготавливаются прессованием или литьем под давлением и в дальнейшем почти не требуют

механической обработки. При этом полимерные изделия обладают рядом ценных электротехнических, механических и физико-технических свойств [1].

В данной работе рассмотрим особенности полимеров в электроизоляционных деталях (ЭИД).

ЭИД используются практически во всех отраслях промышленности: энергетическая, химическая, электротехническая, металлургическая, приборостроение, машиностроение, строительство [2].

Надежная долговременная работа электрических приборов в значительной степени определяется совершенством системы электрической изоляции, правильностью выбора и качеством используемых электроизоляционных материалов и компонентов.

Некоторые материалы, используемые в электрических приборах, обладают диэлектрическими свойствами, то есть имеют большое сопротивление току, что позволяет им не пропускать ток, а поэтому их используют для создания изоляции токоведущих частей.

Электроизоляционные материалы предназначены не только для разделения токоведущих частей, но и для создания защиты от опасного воздействия электрического тока. Например, шнуры питания электрических приборов покрыты изоляцией [3]. Некоторые параметры материала, предназначенного для электрической изоляции, определяют его качество и возможности.

Нормальная работа электрического прибора или безопасность схемы электроснабжения во многом зависит от используемых диэлектриков.

При проектировании изделия его материал и компоненты должны полностью соответствовать заданным условиям. При выборе материала электроизоляционных деталей необходимо учитывать их назначение. А значимым является определение свойств материалов, чтобы выполнять свои функции.

То есть, рассмотрение возможности использования полимеров и адекватность их применение в электрических приборах является одним из направлений научных исследований, которое способно повысить надежность и качество изделий, которые изготавливаются, что обуславливает актуальность работы.

Основные параметры электроизоляционных материалов

Для изготовления ЭИД в настоящее время используются разнообразные, нередко весьма сложные приемы химического синтеза, ламинирования, экструзии, прессования, различные виды обработки [6, 7].

Основой для производства электроизоляционных материалов служат синтетические смолы, пластмассы, полимеры, стекловолокно, натуральные и синтетические ткани.

При изготовлении электроизоляционных деталей к основным параметрам относят электрическую прочность, удельное электрическое сопротивление, относительную диэлектрическую проницаемость, угол диэлектрических потерь.

Электрическая прочность – напряженность поля, при котором происходит пробой (материал теряет свои электроизоляционные свойства происходит так называемый пробой диэлектрика) [8, 9].

Удельное электрическое сопротивление – физическая величина, характеризующая способность вещества препятствовать прохождению электрического тока [10].

Относительная диэлектрическая проницаемость – отношение емкости конденсатора с данным диэлектриком к емкости конденсатора таких же геометрических размеров, но диэлектриком которого является воздух (вакуум).

Способность диэлектрика рассеивать энергию в электрическом поле обычно характеризуют углом диэлектрических потерь, а также тангенсом угла диэлектрических потерь. При испытании диэлектрик рассматривается как диэлектрик конденсатора, у которого измеряется емкость и угол δ , дополняющий до 90° угол сдвига фаз между током и напряжением в емкостной цепи. Этот угол называется углом диэлектрических потерь [11].

При оценке электроизоляционных свойств материала учитывается также зависимость перечисленных характеристик от величин электрического тока и напряжения.

ЭИД и материалы обладают большей величиной электрической прочности в сравнении с проводниками и полупроводниками.

Важна также для диэлектрика стабильность удельных величин при нагревании, повышении напряжении и других изменениях.

Характеристики и рекомендации по применению полимеров для изделий приборостроения приведены в табл. 1 [12].

Табл. 1. Характеристика и рекомендации по применению полимеров для изделий приборостроения

Название Материала, его марка	Рекомендуемое применение	Технологические свойства					
		Уд. давление оптимальное	Время выдержки на 1 мм толщины	Температура прессования		Предварительный подогрев	
				Кг/см ³	мин	Без подогрева	С подогревом
1	2	3	4	5		6	
Стекло- текстолит, СТК-41	Колодки, ролики, втулки изоляционные	-	-	-	-	-	-
Фторопласт – 3	Для изготовления электроизоляционных деталей приборов низкочастотной аппаратуры, а также для изготовления суспензий для электроизоляционных и антикоррозийных покрытий	300 – 500	Охлаждения до 100 – 120°C	220	-	-	-
Фторопласт – 4	Для изготовления проходных изоляторов, втулок, панелей и т.д. Пленки для межслоевой изоляции в высокочастотной аппаратуре	Не менее 200	Прессование на холоде и спекание при температуре 360 – 370 °C				
Полиэтилен, ПЭ- 300, ПЭ-450	Контурные катушки, конденсаторы, каркасов, планки	200	Охлаждение до 40 – 50 °C	160 – 180	-	175 – 250	-

1	2	3	4	5	6	1	2
Полистирол Блочный, Д	Детали высокочастотной аппаратуры: каркасы катушек, панели, изоляторы. Прокладки, колпачки, планки для высокочастотных конденсаторов	200 – 400	1 – 1,5	135 – 170	-	-	-
Полистирол эмульсионный, А	Каркасы, наконечники, панели, прокладки, колпачки	150 – 200	1 – 1,5	135 – 160	-	-	-
Смола полиамидная	Штепсельные разъемы, ламповые панели, корпусов переменных сопротивлений	150 – 180	-	250 – 260	-	-	-

Для изготовления ЭИД существуют специальные материалы – электроизоляционные материалы (ЭИМ). Классификация ЭИМ (диэлектрики) основана на их агрегатном состоянии (твердые, жидкие и газообразные) и происхождению (органические: естественные и

Твердые диэлектрики делятся на неполярные, полярные и сегнетоэлектрики. Их главные отличия состоят в механизмах поляризации. Этот класс изоляции обладает такими свойствами, как химическая стойкость, трекинговая стойкость, дендритостойкость.

Химическая стойкость выражается в способности противостоять влиянию различным агрессивным средам (кислота, щелочь и т.д.).

Трекинговая стойкость определяет возможность противостоять воздействию электрической дуги, а дендритостойкость – образованию дендритов [12].

Разработка алгоритма выбора ПМ для изготовления ЭИД

Проектирование ЭИД в общем виде включает в себя следующие этапы:

- выбор формы детали;
- выбор материала;
- расчеты (проектируемая ЭИД должна быть надёжна в эксплуатации; должна обеспечивать эксплуатационные характеристики согласно требованиям; спроектированной ЭИД должна быть дана экономическая оценка);
- создание рабочей конструкторской документации.

Процесс проектирования ЭИД из полимеров должен обеспечивать максимальную технологичность конструкции. Это предполагает достижение минимальной стоимости, экономии материала, упрощение конструкции формирующего инструмента, повышение надежности и долговечности детали.

Предлагается алгоритм выбора ПМ для изготовления ЭИД рис. 1.

синтетические, неорганические: природные и искусственные). Наиболее распространен тип твердых ЭИМ, которые можно увидеть на шнурах бытовой техники или любых других электрических приборов [10].

1 Этап – определение: ЭИД работает при повышенной влажности? Если – «нет», то есть, ЭИД работает при нормальной влажности, то переходим к этапу 2. Если условие выполняется «да», то ПМ должен обладать свойствами, мало зависящими от влажности.

2 Этап – определение: ЭИД работает при повышенной температуре? Если условие выполняется «да», то ПМ должен обладать свойствами, мало зависящими от температуры. Если – «нет», то переходим к этапу 3. Когда выполняются условия 1 и 2 этапа, то необходимо будет выбрать ПМ с высокой теплостойкостью и малой водопоглощаемостью и перейти к этапу 4.

3 Этап – определение: ЭИД работает при пониженной температуре? Если условие выполняется «да», то ПМ должен обладать свойством морозостойкости без проявлений хрупкости, а значит, необходимо определить параметр $T_{\text{в}}$ (этап 3.1) [12, 13]. Если – «нет», то переходим к этапу 6 (определение типа нагрузки).

4 Этап – определение: ЭИД работает при кратковременном повышении (до 3 мин) температуре? Тогда необходимо выбирать ПМ с высокой теплостойкостью, а если при этом на ЭИД не действует внешняя механическая нагрузка (этап 5). Таким образом, ПМ должен обладать стойкостью к размягчению, далее необходимо определить параметр – температура размягчения по Вика $T_v, ^\circ C$ при нагрузке 9,8 Н (этап 5.1) [12]. Далее переходим к этапу 6.

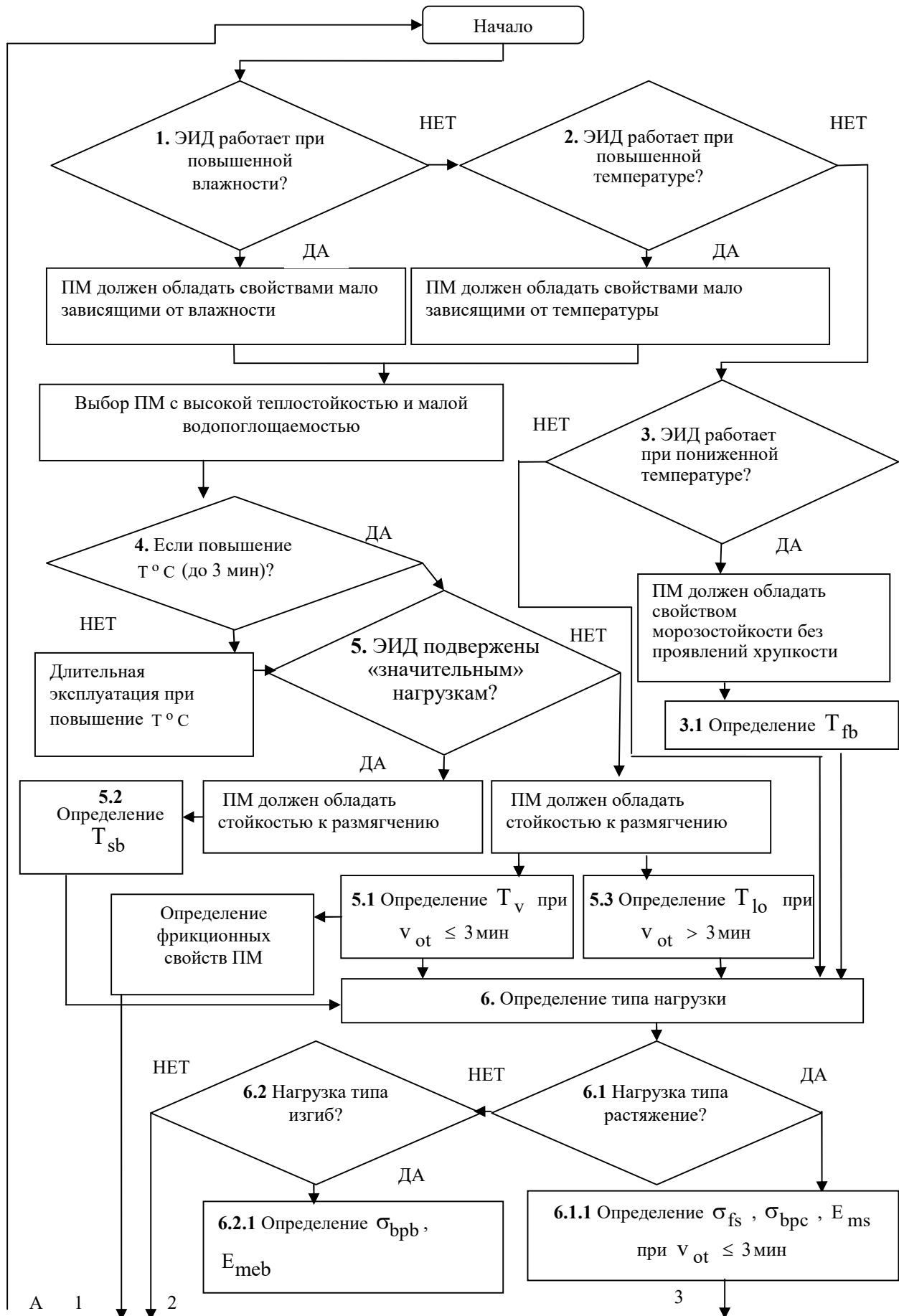


Рис. 1. Алгоритм выбора ПМ для изготовления ЭИД

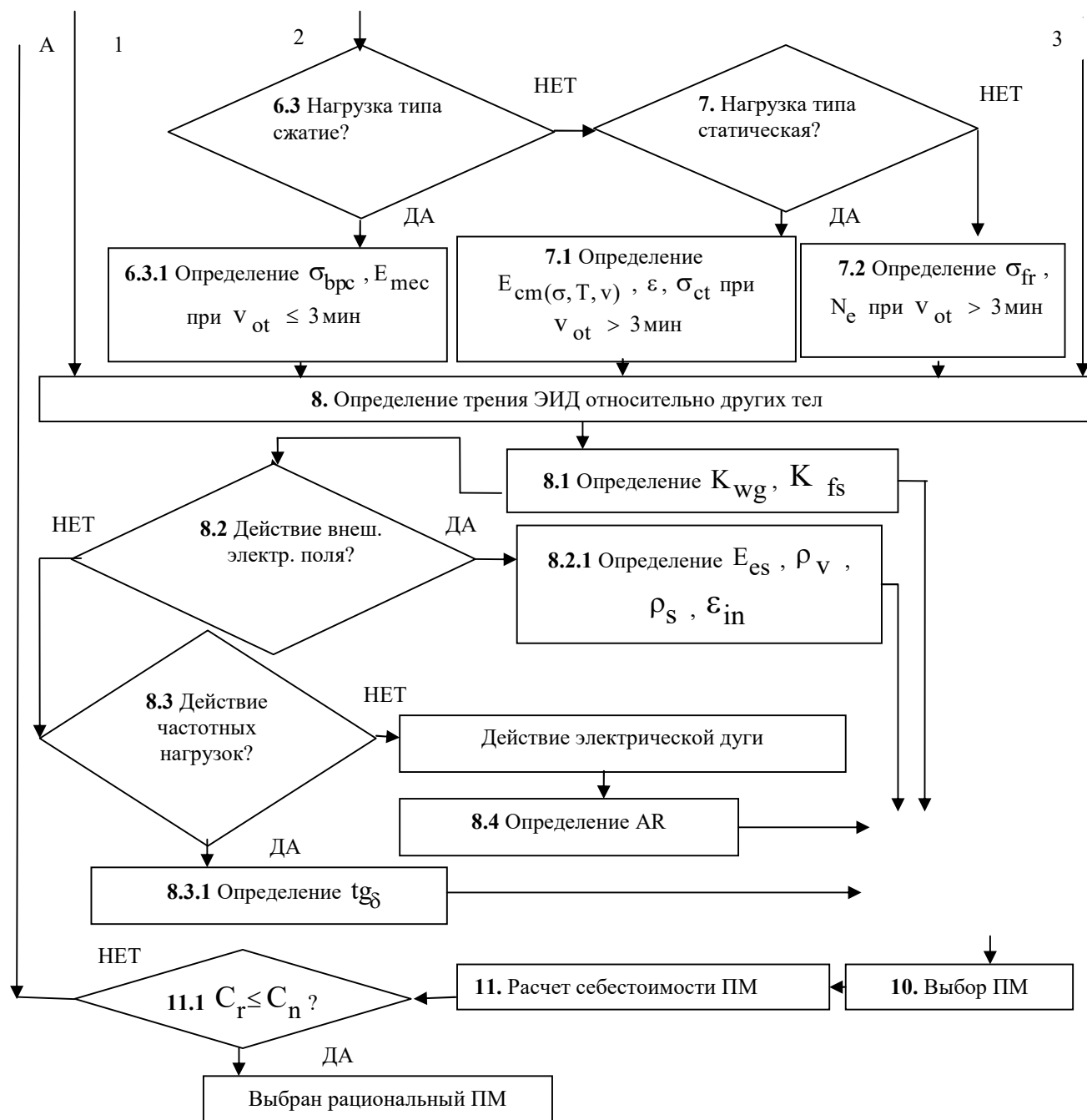


Рис. 1. Алгоритм выбора ПМ для изготовления ЭИД

5 Этап – определение: подвержены ли ЭИД «значительным» нагрузкам). Если происходит длительная эксплуатация при повышенной температуре (возможна механическая нагрузка), значит, ПМ должен обладать стойкостью к размягчению. Тогда необходимо определить параметр – температура размягчения при изгибе (softenings at a bend) $T_{sb}, ^\circ C$ (этап 5.2) [12] и затем переходим к этапу 6.

В случае, при длительной эксплуатации (operation time $v_{ot} > 3 \text{ мин}$) ЭИД при повышенной температуре, но без механической нагрузки, то далее необходимо определить параметр – температуру длительной эксплуатации (long

operation) $T_{\sigma}, ^\circ C$ (этап 5.3), которая будет рассчитываться на период в 10 лет: $T_{10} = \Sigma T_{101} + T_{102} + \dots + T_{1010}$ [12]. Далее переходим к этапу 6.

Если ЭИД работает при нормальной температуре, то переход к определению типа нагрузки (этап 6). После выбора таких свойств материала (высокая теплостойкость, малая водопоглощаемость, морозостойкости без проявлений хрупкости и т.д.) также переходим к определению типа нагрузки.

6 Этап – определение типа нагрузки. Если ЭИД работает при приложенной нагрузке в течение 1 – 3 с., то определяем тип нагрузки: растяжения, изгиба, сжатия.

6.1 Этап – определение: на ЭИД действует нагрузка типа «растяжение»? Если «да», то определяем стойкость к текучести, а именно, предел текучести при растяжении (*fluidity at stretching* σ_{fs} , МПа); разрушающее напряжение при растяжении (*breaking point at stretching* σ_{bps} , МПа); жесткость, обеспечивающую малое обратимое деформирование детали (высокий модуль упругости) – модуль упругости при растяжении (*modulus of elongation at stretching* E_{ms} , МПа) (этап 6.1.1) [14].

6.2 Этап – определение: на ЭИД действует в течение 1 – 3 с. нагрузка типа «изгиб»? При нагрузке типа изгиб определяем: прочность или пределе текучести при изгибе / разрушающее напряжение (*breaking point at a bend* σ_{bpb} , МПа); жесткость, обеспечивающую малое обратимое деформирование детали (высокий модуль упругости) – модуль упругости при изгибе (*elasticity module at a bend* E_{meb} , МПа) (этап 6.2.1) [14].

Если при приложенная нагрузка в течение 1 – 3 с. – не растяжение и не изгиб, значит это сжатие (этап 6.3). При нагрузке типа сжатие определяем: прочность по пределу текучести при сжатии / разрушающее напряжение (*breaking point at compression* σ_{bpc} , МПа); жесткость (высокий модуль упругости) – модуль упругости при сжатии (*modulus of elasticity in compression* E_{mec} , МПа) (этап 6.3.1) [14]. Далее переходим к этапу 8.

Если ЭИД работает при длительной приложенной нагрузке при $V_{ot} > 3min$, то определяем тип нагрузки: статическая (растяжение или изгиб при обычной или повышенной температуре); циклическая (изгиба, растяжения – сжатия и др. при знакопеременном или знакопостоянном законе изменения нагрузки в пределах одного цикла) (этап 7).

7 Этап – определение: на ЭИД действует нагрузка типа «статическая»? Тогда определяем стойкость к ползучести – развитие общей деформации (низкая ползучесть). То есть, определяем параметры: модуль ползучести (*creep modulus* $E_{cm(\sigma, T, v)}$, МПа); деформация $\varepsilon, \%$, развившаяся в детали при приложении постоянного напряжения σ и температуре T к моменту времени v ; прикладываемое постоянное напряжение (*constant tension* σ_{ct}), которое при температуре T к моменту времени v вызывает деформацию ε (этап 7.1) [15, 16]. Далее переходим к этапу 8.

Если на ЭИД не действует нагрузка типа «статическая», значит – циклическая. При нагрузке типа циклическая, определяем стойкость к усталостному разрушению – сохранение работоспособности. То есть, определяем параметры: усталостную прочность (*fatigue resistance* σ_{fr} , МПа); выносливость (*endurance* N_c) (этап 7.2) [17]. Далее переходим к этапу 8.

После определения механических свойств ПМ переходим к определению фрикционных свойств ПМ.

8 Этап – определение трения ЭИД относительно других тел. Переход к этапу 8.1.

Если ЭИД работает без повышений / понижений температур, без повышения влажности, то также переходим к определению фрикционных свойств ПМ (этап 8). Определяем трения ЭИД относительно других тел, а именно, параметр – коэффициент износа по сетке (*wear coefficient on a grid* $K_{wg, мм^3/(м \cdot см^3)}$); коэффициент трения по стали (*friction coefficient on steel* K_{fs}) (этап 8.1) [18].

8.2 Этап – определение наиболее значимых свойств – диэлектрические. Необходимо определить тип действия электрических нагрузок: действие внешнего электрического поля; действие частотных нагрузок; действие электрической дуги.

То есть, для начала определяем, какая электрическая нагрузка действует, если это действие внешнего электрического поля (этап 8.2). Значит, определяем параметр – электрическая прочность (*electric strength*) E_{es} , кВ/мм при переменном напряжении, частота 50 Гц; удельное объемное электрическое сопротивление $\rho_v, Ом \cdot м$; удельное поверхностное электрическое сопротивление $\rho_s, Ом$; диэлектрическая проницаемость ε_{in} (этап 8.2.1) [19, 20].

Если условие не выполняется, то переход к этапу 8.3.

8.3 Этап – определение: на ЭИД действуют частотные нагрузки? Если, выполняется условие, то необходимо найти стойкость к необратимому рассеиванию части энергии внешнего электромагнитного поля. Следовательно, определяем тангенс угла диэлектрических потерь $tg\delta$ (этап 8.3.1) [20 – 23].

Если условие не выполняется, то тип электрической нагрузки на ЭИД – действие электрической дуги. Определяем способность сохранять электроизоляционные свойства.

Не образовывать на поверхности ЭИД токопроводящего мостика при действии электрической дуги от переменного тока небольшой силы (10 – 40 мА) и высокого напряжения. То есть, определяем параметр – дугостойкость (*arc resistance AR*) (этап 8.4) [24, 25].

После выполнения всех условий, предпоследний этап – выбор метода переработки ПМ с учетом определенных ранее свойств (этап 9).

10 Этап – назначение весовых коэффициентов, чем больше коэффициент, тем важнее параметр ($W_1 + W_2 + W_3 + \dots + W_n = 1$).

11 Этап – выбор ПМ с учетом всех свойств ПМ.

12 Этап – определение себестоимости ПМ.

12.1 Этап – определение не превышает требуемые нормы $C_r \leq C_n$? Если условие выполняется «да», то ПМ выбран рационально. Если же условие не выполняется, то переход А (начало схемы). Тогда процесс выбора ПМ начинается с самого начала пока не будет $C_r \leq C_n$.

Выводы

В результате, предложен алгоритм выбора ПМ для изготовления электроизоляционных деталей, который позволяет найти рациональный материал, свойства которого важно учесть при проектировании формирующего инструмента для получения качественной полимерной детали.

На основании проведенных исследований в области применения полимеров, как электроизоляционного материала определено, что наиболее важным при выборе материала является температурный интервал эксплуатации ЭИД.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Olabisi, O. *Handbook of thermoplastics (Vol. 41)*. – CRC press: New York. – 2016. – 957 p.
2. Li, S. *Progress in and prospects for electrical insulating materials*. – *High voltage*. – 2016. – №1(3). – P. 122-129.
3. Raju, G. G. *Dielectrics in electric fields*. – CRC press: New York. – 2016. – 776 p.
4. Xiao, L. *Mechanical properties analysis of polyimide insulating layer for the multilayer circuit boards based on 3D printing technology // In Electronic Packaging Technology (ICEPT), 2017 18th International Conference*. – 2017. – P. 94-97.
5. Gupta, K. M. *Advanced electrical and electronics materials: processes and applications*. – John Wiley & Sons. – 2015. – 760 p.
6. Xiao, M. *Review of high thermal conductivity polymer dielectrics for electrical insulation // High voltage*. – 2015. – №1(1). – P. 34-42.
7. Gallot-Lavallée, O. *Caractérisation des polymères par spectroscopie diélectrique*. – *Les Techniques de l'Ingenieur*. – 2016. – 320 p.
8. Kato, F. *Electrical conduction and dielectric relaxation in polyethylene terephthalate succinate // Electrical Engineering in Japan*. – 2010. – №170(4). – P. 1-8.
9. Headland, D. *Doped polymer for low-loss dielectric material in the terahertz range // Optical Materials Express*. – 2015. – № 5(6). – P. 1373-1380.
10. Thue, W. A. *Electrical power cable engineering*. – CRC Press: New York. – 2017. – 299 p.
11. Jarvid, M. *A new application area for fullerenes: voltage stabilizers for power cable insulation // Advanced Materials*. – 2015. – №7(5). – P. 897-902.
12. Slade, P. G. *Electrical contacts: principles and applications*. – CRC press: New York. – 2017. – 1311 p.
13. Nicholson, J. *The chemistry of polymers*. – Royal Society of Chemistry. – 2017. – 174 p.
14. Parrish, A. *Mechanical engineer's reference book*. – Elsevier. – 2014. – 1612 p.
15. McKeen, L. W. *Fatigue and tribological properties of plastics and elastomers*. – William Andrew. – 2016. – 312 p.
16. Li, Q. *Flexible high-temperature dielectric materials from polymer nanocomposites // Nature*. – 2015. – №523(7562). – 576 – 579 p.
17. Rosato, M. G. *Plastics design handbook*. – Springer Science & Business Media. – 2013. – 392 p.
18. Kuksenko, V. S. *Fracture micromechanics of polymer materials*. – Springer Science & Business Media. – 2013. – Vol. 2. – 311 p.
19. Hu, P. *Topological-Structure Modulated Polymer Nanocomposites Exhibiting Highly Enhanced Dielectric Strength and Energy Density // Advanced Functional Materials*. – 2014. – № 24(21). – P. 3172-3178.
20. Callister Jr, W. D. *Fundamentals of materials science and engineering: an integrated approach*. – John Wiley & Sons. – 2012. – 738 p.
21. Wu, C. *Hyperbranched-polymer functionalization of graphene sheets for enhanced mechanical and dielectric properties of polyurethane composites // Journal of Materials Chemistry*. – 2012. – № 22(14). – P. 7010-7019.
22. Hao, X. *A review on the dielectric materials for high energy-storage application // Journal of Advanced Dielectrics*. – 2013. – № 3(01). – P. 133 – 136.
23. Dang, Z. M. *Flexible nanodielectric materials with high permittivity for power energy storage // Advanced Materials*. – 2013. – №25(44). – P. 6334-6365.
24. Thomas, P. *Dielectric properties of poly (vinylidene fluoride)/CaCu₃Ti₄O₁₂ nanocrystal composite thick films*. – arXiv preprint arXiv. – 2013.
25. Pirzada, B. M. *Polymer-based nanocomposites for significantly enhanced dielectric properties and energy storage capability // In Polymer-based Nanocomposites for Energy and Environmental Applications*. – 2018. – p. 131-183.