

*Б.Е. Васильев, заместитель генерального директора;
В.Т. Пивненко, консультант;
ЗАО «Термопровод»*

О ВЛИЯНИИ ЧАСТОТЫ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ НА ПОЛИИМИДНО-ФТОРОПЛАСТОВУЮ ПЛЁНОЧНУЮ ИЗОЛЯЦИЮ

Аннотация. В статье анализируются результаты испытаний напряжением обмоточных проводов с плёночной изоляцией. Показано влияние частоты и величины испытательного напряжения на время от начала испытания до момента возникновения электрического пробоя изоляции. Показано, что провод выдерживает воздействие испытательного напряжения величиной 10 кВ при частоте 50 Гц и пробивается при том же напряжении и частоте 2333 Гц, характерной для испытаний на ЗАСИ. Даны рекомендации по корректировке норм технических условий.

Ключевые слова: ЗАСИ; провод ППИ-У; испытание напряжением на проход; обмоточные провода; испытание высоким напряжением.

Abstract. The authors analyze the results of voltage testing of winding wires with film insulation. The effect of frequency and test voltage value on the time from the beginning of the test to the moment of the insulation breakdown is shown. The wire withstands the applied 10 kV test voltage of 50 Hz frequency and breaks down at the same voltage and frequency of 2333 Hz typically used in spark testing или typical of testing with audio frequency dry test apparatus. Recommendations for specification norm corrections are given.

Key words: audio frequency dry test apparatus; PPI-U wire; spark testing; winding wires; high-voltage test.

Материал поступил в редакцию 26.04.2019
Васильев Б.Е. E-mail: boris@vasilyeff.com

При любом производстве сталкиваются с браком продукции. Часть брака выявляется на этапе сдаточных испытаний производителем, другая часть – потребителем во время приёмочных испытаний, что наносит репутационные потери производителю и вызывает недоверие к качеству его продукции. Самым затруднительным в плане выяснения причин возникновения брака для производителя является случай, при котором во время сдаточных испытаний на стороне производителя продукция соответствует техническим условиям и проходит испытания, а на стороне потребителя выявляется брак.

С подобным случаем столкнулись при производстве обмоточных проводов марки ППИ-У с плёночной полиимидно-фторопластовой изоляцией для нефтепогружных электродвигателей в ЗАО «Термопровод». Был зафиксирован случай брака при прохождении приёмо-сдаточных испытаний в соответствии с техническими условиями (ТУ 16-705.159–80). Провод при входном контроле у потребителя не прошёл испытание на аппарате ЗАСИ напряжением 10 кВ на проход, при этом эти же испытания на стороне производителя провод выдержал. Однако стандартные испытания напряжением на пробой на высоковольтной установке провод выдерживает как у производителя, так и у потребителя.

В ходе выяснения причин возникновения брака было установлено, что многостадийный контроль на производстве (провод подвергается испытанию напряжением

на проход дважды: на этапе производства и при последующей контрольной перемотке) отрицательно влияет на изоляцию провода.

При этом испытания на проход осуществлялись на аппаратах типа ЗАСИ, в которых частота испытательного напряжения 1500–2333 Гц.

Для подтверждения предположения о влиянии частоты испытательного напряжения на изоляцию и выявления зависимости этого влияния от различных факторов, были отобраны по 5 контрольных образцов для проведения испытаний, а именно:

1. Полиимидно-фторопластовая плёнка марки ПМФ-2-ДТП 50/25.

2. Провод марки ППИ-У диаметром 2,50 мм.

Для выяснения влияния частоты испытательного напряжения на изоляцию все образцы были подвергнуты испытаниям до возникновения пробоя при одинаковых климатических условиях на одних и тех же испытательных установках:

– выдержка образцов плёнки при напряжениях 3,5; 4,5; 5,6 кВ (50 Гц);

– выдержка образцов плёнки при напряжениях 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 3,5 кВ (2333 Гц);

– выдержка образцов провода при напряжениях 8, 10, 15 кВ (50 Гц);

– выдержка образцов провода при напряжениях 6, 7, 8, 10 кВ (2333 Гц).

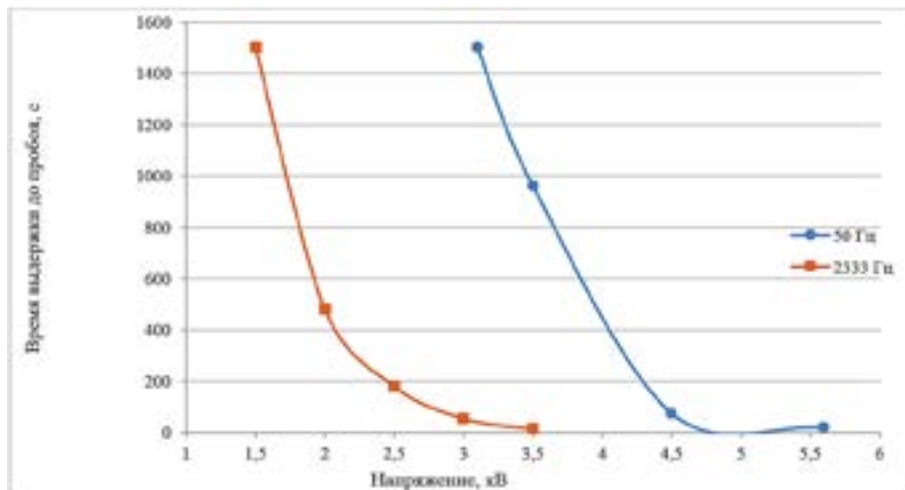


Рис. 1. Зависимость времени выдержки до пробоя плёнки марки ПМФ-2-ДТП 50/25 от напряжения

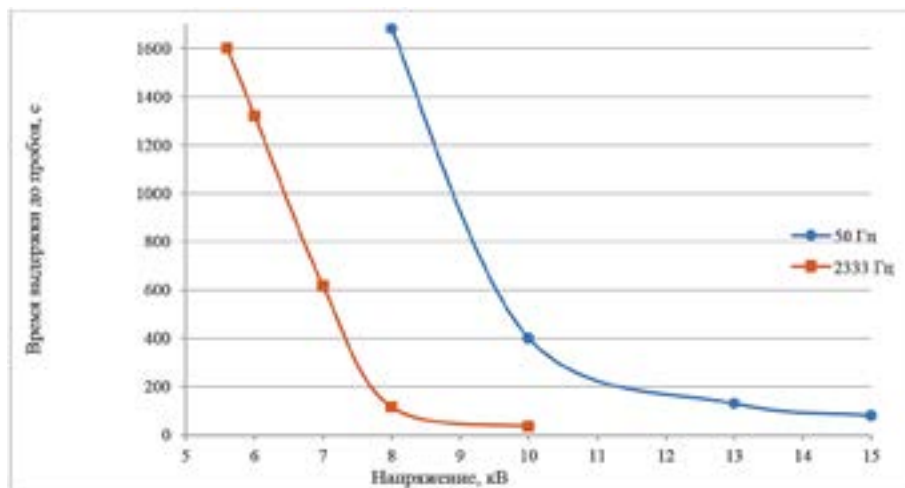


Рис. 2. Зависимость времени выдержки до пробоя проводов марки ППИ-У от напряжения

На рис. 1 представлен график, на котором показаны зависимости времени выдержки до возникновения пробоя для плёнки ПМФ-2-ДТП 50/25 на высоковольтной установке при частоте 50 Гц и аппарате ЗАСИ (2333 Гц).

Как видно из рис. 1, при одинаковом напряжении наблюдается значительное изменение времени выдержки до пробоя плёнки при разных частотах испытательного напряжения.

Аналогичные по формату зависимости для провода марки ППИ-У приведены на рис. 2.

Как видно из рис. 1 и 2, образцы как плёнки, так и провода при одинаковом значении испытательного напряжения быстрее выходят из строя (уменьшается время выдержки до пробоя) при частоте испытательного напряжения 2333 Гц. На графике имеется условная область «перегиба», которая находится возле малых значений времени выдержки до пробоя образцов. Все значения напряжения, что находятся правее этой области, опасны для изоляции провода, так как в таких условиях изоляция провода «живёт» секунды, а все значения левее условно безопасны, поскольку «время жизни» провода там значительно выше.

Фактор опасности такого напряжения обуславливается тем, что, подвергаясь испытаниям напряжением на проход, каждая точка изоляции подвергается испытательному напряжению в течение определённого времени. Поскольку данные испытания обычно происходят параллельно с изготовлением провода, скорость производства которого для данного типа провода невелика (в диапазоне от 3 до 6 м/мин), а участок приложения испытательного напряжения достигает 10 и более сантиметров (в зависимости от размера испытательного электрода на установке ЗАСИ), время приложения напряжения к точке провода достигает 5 с. Также необходимо учитывать, что данные испытания могут повторяться с целью дополнительного контроля на стороне производителя, а также проводиться у потребителя в составе приёмочных испытаний. Соответственно суммарное время влияния напряжения на каждую точку изоляции провода удваивается или утраивается. Все значения напряжения, не имеющие многократного запаса по времени выдержки до пробоя, в зависимости от времени приложения испытательного напряжения, разрушительно влияют на изоляцию провода.

ТУ16-705.159–80 обязывают производителя и потребителя испытывать изоляцию на проход

для рассматриваемого типа провода напряжением 10 кВ. Как показали многократные испытания, среднее «время жизни» данного типа провода при таком напряжении на установке ЗАСИ составляет всего 25 с, то есть за время проведения испытаний как производитель, так и потребитель фактически существенно разрушают изоляцию провода. Для подтверждения этого предположения был осуществлён эксперимент, в ходе которого на перемоточном станке через аппарат ЗАСИ в одинаковых климатических условиях был подвергнут многократной перемотке провод марки ППИ-У длиной 200 м под напряжением 10 кВ на проход в соответствии с ТУ 16-705.159–80. На рис. 3 представлен сравнительный график количества пробоев в зависимости от числа перемоток провода.

Как видно из графика на рис. 3, уже на третьей перемотке провода, совмещённой с испытанием на проход, с вероятностью 100 % происходит пробой изоляции. Если учесть, что испытания проводились на линии наложения изоляции при скорости 4,5 м/мин, можно предположить, что, уменьшив скорость до минимальных производственных значений, мы получим 100 % возникновение пробоев уже на второй перемотке. То есть при испытании напряжением на проход производителем провод его

выдерживает, но уже у потребителя во время второго по счёту испытания высока вероятность возникновения пробоя изоляции этого же провода. Это подтверждает наше предположение, что испытательное напряжение на проход на аппарате ЗАСИ величиной в 10 кВ является необоснованно завышенным и приводит к повреждению изоляции провода.

Для исключения влияния механических воздействий на рост числа пробоев по мере роста количества перемоток был проведён эксперимент, в ходе которого при первой перемотке провод подвергался контрольному испытанию напряжением на проход величиной 8 кВ (достаточного для выявления всех предполагаемых данным типом испытаний дефектов), со 2 по 8 перемотку испытательное напряжение не прилагалось, а начиная с 9 перемотки было приложено напряжение в 10 кВ (в соответствии с требованиями технических условий).

Как видно из рис. 4, ни механическое воздействие во время перемотки, ни испытательное напряжение в 8 кВ не вызывают пробоя изоляции. Пробои начинают возникать, начиная с десятой перемотки, то есть второй перемотки после приложения напряжения 10 кВ, что соответствует первому графику перемоток и подтверждает отсутствие механического воздействия перемоточного станка на электрическую прочность изоляции.

Для определения оптимальной величины испытательного напряжения на проход, при котором дефекты, которые должно выявлять данное испытание (механические повреждения изоляции и прочие неоднородности), будут выявлены, но при этом не будет искусственно повреждаться изоляция, вначале следует установить соотношение между электрической прочностью плёнки в исходном состоянии и изготовленной из этой плёнки изоляции провода. Это необходимо для разбраковки на этапе входного контроля плёнки, которая имеет пониженную стойкость к напряжению на проход, позволяет установить гарантированно безопасное напряжение на проход для различных марок готового провода (в зависимости от толщины изоляции), а также определить допустимое безопасное время выдержки провода под напряжением до пробоя.

Такая методика позволит, не прибегая к производству проводов и не занимая производственное оборудование экспериментами, выяснить необходимое значение напряжения для испытания изоляции провода на проход.

Предельно допустимое время воздействия напряжения для полиимидно-фторопластовой изоляции провода марки ППИ-У условно примем 1000 и более секунд. Обосновано это тем, что при таком уровне воздействия за 1 с будет условно «теряться» 0,1 % прочности изоляции до пробоя. То есть примерно за 6–10 с воздействия во время приёмо-сдаточных испытаний будет потеряно не более 1 % прочности изоляции до пробоя, что является несущественным для работоспособности изоляции данного типа провода. Данное время воздействия соответствует примерно 6,0 кВ для провода марки ППИ-У при испытании аппаратом ЗАСИ с частотой 2333 Гц. Указанная величина напряжения будет достаточна для выявления любых дефектов, которые предполагает испытание напряжением на проход. Данное время аналогично можно применить и для отдельной плёнки,

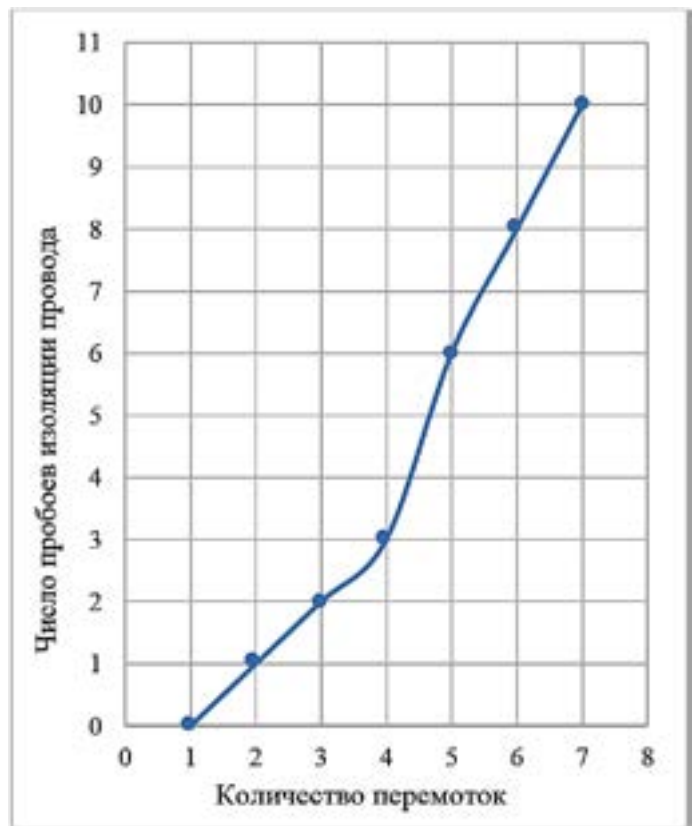


Рис. 3. Зависимость числа пробоев изоляции провода марки ППИ-У от количества перемоток под напряжением 10 кВ на проход

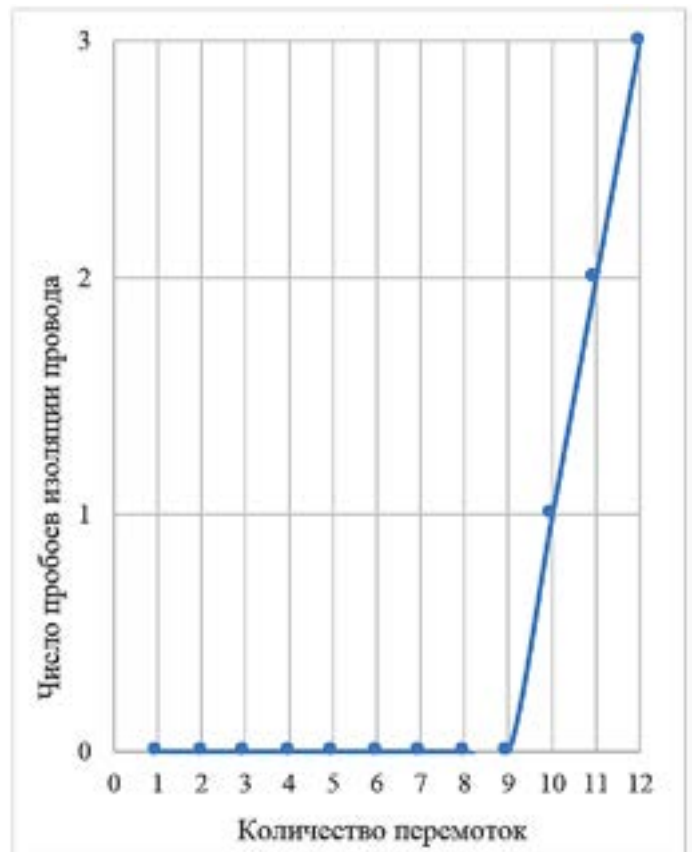


Рис. 4. Зависимость числа пробоев изоляции провода марки ППИ-У от количества перемоток

при этом следует начинать определение данного времени воздействия именно с исходного материала изоляции, а далее экстраполировать это время воздействия на необходимый маркоразмер провода.

Установив нижнее предельное время воздействия напряжением на данный тип изоляции, необходимо установить коэффициент падения электрической прочности при времени выдержки 1000 с между исходным материалом изоляции и готовой изоляцией. Далее опытным путём устанавливается напряжение, при котором образец плёнки и готового провода на определённом типе установки с определённой частотой испытательного напряжения будет выдерживать 1000 с до пробоя. В итоге из отношения этих двух величин будет получен коэффициент преобразования. Для его подтверждения этот коэффициент будет установлен на двух частотах (50 Гц и 2333 Гц).

Образец плёнки толщиной 50 мкм выдерживает напряжение 1,8 кВ на ЗАСИ при частоте 2333 Гц 1000 с, что соответствует 35,9 кВ/мм. Образец провода марки ППИ-У с толщиной изоляции 225 мкм на сторону выдерживает 6,00 кВ в течение 1000 с при частоте 2333 Гц, что соответствует 26,60 кВ/мм. Таким образом, соотношение между этими значениями равно 1,3496. При аналогичном испытании на высоковольтной установке (50 Гц) образец плёнки выдержал 1000 с при напряжении 2,8 кВ, а образец провода – при напряжении 9,1 кВ, что соответствует 54 кВ/мм и 40,4 кВ/мм соответственно, то есть отношение между этими значениями равно 1,3363. Для подтверждения полученных значений проведём испытание при времени выдержки до пробоя 60 с для 50 Гц и 60 с для 2333 Гц. В первом случае образец плёнки выдержал 4,5 кВ, а образец провода 15 кВ, или 90 кВ/мм и 66,7 кВ/мм соответственно, то есть отношение значений равно 1,3493. Во втором случае образец плёнки выдержал 3,0 кВ, а образец провода 10 кВ. Соответственно получены значения 60 кВ/мм и 44,5 кВ/мм, то есть отношение значений равно 1,3483. Таким образом, эмпирический коэффициент падения электрической прочности после превращения исходной плёнки в изоляцию независимо от времени выдержки до пробоя и частоты напряжения равен примерно 1,35. То есть с ростом частоты испытательного напряжения при неизменном времени выдержки до пробоя испытательное напряжение будет падать, но последующее преобразование электрической прочности исходной плёнки в напряжённость электрического поля в изоляции возможно через постоянный коэффициент.

Определив данный коэффициент, проект методики расчёта безопасного испытательного напряжения можно свести к следующему:

1. Определяется напряжение пробоя плёнки на испытательной установке с временем выдержки до пробоя 1000 с.

2. Определяется расчётным путём электрическая прочность плёнки в кВ/мм.

3. Полученные значения делятся на коэффициент 1,35 и получаются расчётные данные для готовой изоляции провода.

4. Пересчитываются значения напряжённости для каждого маркоразмера провода, исходя из номинальной толщины изоляции, что позволяет получить безопасное напряжение для испытания готового провода напряжением на проход на определённой установке.

Таким образом, предлагается методический подход к определению безопасного, но эффективного испытательного напряжения на проход, которое можно использовать как производителем, так и потребителем при проведении одновременно качественных и безопасных для изоляции провода испытаний.

Данная методика может и должна подвергнуться уточнению и перепроверке на большем количестве типов полиимидных плёнок и большем количестве маркоразмеров провода. И это, безусловно, внесёт корректировку коэффициента; возможно, потребуются введение разных коэффициентов для различных условий испытаний, однако общий тип зависимости электрической прочности изоляции на проход от частоты напряжения останется в полученном нами виде. Очевидно, что для проведения качественных испытаний проводов будет необходимо учитывать частоту испытательного напряжения.

На основе проведённых исследований можно сделать следующие выводы:

1. Частота испытательного напряжения существенно влияет на время выдержки до пробоя изоляции, и соответственно должна уточняться в технических условиях для испытания напряжением на проход.

2. Действующие ТУ 16-705.159–80 на провода марки ППИ-У нуждаются в корректировке величины испытательного напряжения на проход.

3. Необходимо уточнить методику определения допустимого и эффективного напряжения для испытания провода на проход и экстраполировать её на разные типы изоляции для обоснованной корректировки требований ТУ и полного понимания процессов, происходящих с изоляцией на разных частотах испытательного напряжения.

ПОДПИСАТЬСЯ НА ЖУРНАЛ «КАБЕЛИ И ПРОВОДА» МОЖНО В РЕДАКЦИИ

Стоимость подписки на II полугодие 2019 года (3 номера), в рублях:

- для членов Ассоциации «Электрокабель» – 1275 руб.,
- для учебных заведений и студентов – 480 руб.,
- для остальных подписчиков России и стран СНГ – 1380 руб.,
- для подписчиков зарубежных стран – 33 у.е.

НДС не облагается по ст. 145 НК РФ

По вопросам подписки обращайтесь к Алле Евгеньевне Тимофеевой
Тел./факс: (495) 918–1627
E-mail: kp@vniikp.ru, alla_timofeeva_60@mail.ru

Реквизиты для оплаты в рублях:

ИНН 7722159427
КПП 772201001
р/с: 40702810238120102932
в Московском банке
ПАО «Сбербанк», г. Москва
к/с: 3010181040000000225
БИК 044525225

Подписной индекс в каталогах агентств «Роспечать» и «Урал-Пресс» – **79943**