

## РАБОТА ВМ-35Н В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР

ВОРОБЬЕВ А. А., ТИТОВ В. Н., БОГДАНОВА Н. Б.<sup>1)</sup>

### Введение

В Томском ордена Трудового Красного Знамени политехническом институте систематически проводятся научно-исследовательские работы по изучению поведения электроизоляции и электроаппаратуры в условиях холода [1].

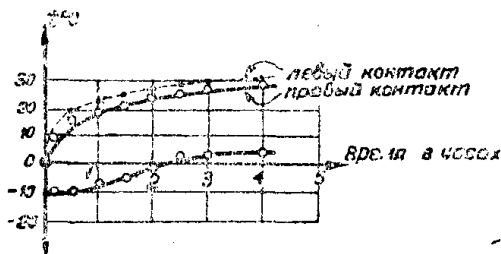
В данной статье мы сообщаем некоторые материалы по исследованию ВМ-35Н [2]. (Номинальный рабочий ток выключателя 600 А). Это исследование проводилось по заданию завода „Электроаппарат“. Программа и методика работ были согласованы с заводом. Исследуемый аппарат с приводом ПС-20 был установлен на бетонный фундамент на открытом воздухе и выверен согласно правил монтажной инструкции.

ВМ-35Н, являющийся представителем серии многообъемных выключателей и имеющий большое применение в открытых распределительных устройствах, представлял большой интерес для исследования в указанном отношении.

### Разогрев выключателя при нагрузке номинальным током

Были проведены наблюдения за разогреванием масла и контактов при пропускании через контакты ВМ тока, по величине близкого к номинальному ( $\approx 600$  А) при следующих температурах окружающего воздуха:  $+3^\circ\text{C}$ ,  $-12^\circ\text{C}$ ,  $-10^\circ\text{C}$ ,  $-20^\circ\text{C}$ ,  $-22^\circ\text{C}$ ,  $-26^\circ\text{C}$ ,  $-28^\circ\text{C}$ ,  $-30^\circ\text{C}$ ,  $-32^\circ\text{C}$ ,  $-33^\circ\text{C}$ . Измерение температур производилось с помощью термопар железо—константан.

На рис. 1, 2 представлен типичный ход кривых разогрева масляного выключателя, снятых при различных температурах окружающего воздуха.



Разогрев масляного выключателя ВМ-35Н при температуре внешнего воздуха  $t = -12^\circ\text{C}$  и при силе тока  $J = 600$  А.

Рис. 1



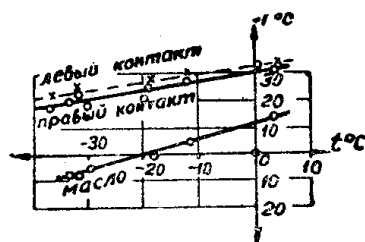
Разогрев масляного выключателя ВМ-35Н при температуре наружного воздуха  $t = -32^\circ\text{C}$  и при силе тока  $J = 620$  А.

Рис. 2

<sup>1)</sup> Подготовительные работы и первые измерения были проведены аспирантами Г. Е. Пуховым и В. А. Воробьевым. При проведении работы мы пользовались консультацией ст. инженера завода „Электроаппарат“ С. А. Чирцова, за что выражаем ему благодарность.

Обращает внимание, что при пропускании тока через контакты ВМ при температуре воздуха минус 32°C через 4 часа температура масла в гасительной камере достигла минус 10°C, а в дальнейшем поднялась и до минус 7,5°C. Что касается температуры контактов, то по истечении 1/3 часа после включения тока она уже стала положительной и через 1 1/2 часа достигла значения порядка 15°C.

Как видно из кривых, приведенных на рис. 2 и 3, температура контактов и масла с течением времени установилась и сохраняла постоянное значение. Очевидно, что величина этой установившейся температуры бу-



Зависимость установившейся температуры контактов и масла ( $T^{\circ}\text{C}$ ) выключателя ВМ-35Н от температуры внешнего воздуха ( $t^{\circ}\text{C}$ ).

Рис. 3

дет зависеть от количества выделяемого тепла и теплоотвода. Первая величина в наших опытах была постоянной. Вторая величина—количество отводимого тепла—зависит от температуры воздуха и атмосферных условий (ветер). В наших условиях ВМ был установлен в закрытом со всех сторон дворе и не подвергался действию ветра. Таким образом, можно грубо ориентировочно принять, что теплоотвод от бака обуславливался только температурой внешней среды. Тогда интересно было посмотреть, как зависит установившаяся температура масла и контактов ВМ от температуры воздуха.

Зависимость между этими величинами представлена на рис. 3, где по оси абсцисс отложена температура внешнего воздуха  $T$  в  $^{\circ}\text{C}$ , а по оси ординат—установившаяся температура контактов и масла  $t$  в  $^{\circ}\text{C}$ .

Как видно из рис. 3, зависимость между этими величинами получается линейной. Точки, соответствующие зависимости между установившейся температурой масла и температурой воздуха, хорошо ложатся на прямую, уравнение которой

$$T = 0,55t + 10,5. \quad (1)$$

Согласно данным, представленным на рис. 3, для установившейся температуры контактов  $t$  в зависимости от температуры воздуха можно написать уравнения такого же типа.

Для правого контакта:

$$T = 0,42t + 30. \quad (2)$$

Для левого контакта:

$$T = 0,42t + 31. \quad (3)$$

Ввиду небольшой разницы между уравнениями (2) и (3) мы для температуры разогрева контактов можем дать одно общее уравнение:

$$T = 0,42t + 30,5. \quad (4)$$

Наблюдение за разогревом ВМ при низкой температуре приводит нас к практически важному заключению. Температура в баке ВМ при нагрузке его номинальным током оказывается значительно выше температуры окружающей среды. В наших условиях теплоотвода температура контактов достигает значения, равного нулю при температуре окружающего воздуха, равной минус 13°C.

Температура масла в баке будет равна нулю при температуре воздуха минус 19°C. Наличие более высокой температуры масла вблизи контактов желательно для обеспечения нормальной работы ВМ. Можно думать, что утепление баков с помощью укрытия их теплоизолирующими материалами окажется в данном случае полезной и достаточной мерой для поддержания в работающем ВМ положительной температуры.

## Вязкость и плотность масла

Для суждения о работе ВМ при различных температурах существенно знать температурный ход вязкости масла. С этой целью производилось измерение вязкости масла при разных температурах. Эти измерения производились с помощью вискозиметра Стокса [3].

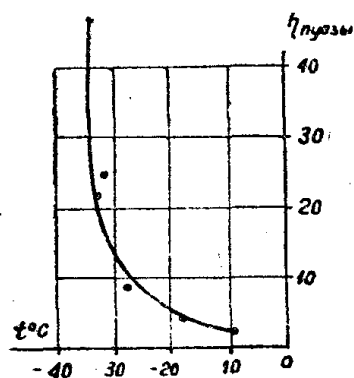
Результаты измерений вязкости масла, заполнявшего баки ВМ, представлены на рис. 4, где по оси абсцисс отложена температура воздуха (масла) в °С, а по оси ординат—коэффициент вязкости  $\eta$  масла в пуазах. Как видно из рис. 4, вязкость масла с понижением температуры увеличивается вначале медленно, затем, при понижении температуры ниже минус 30°C, начинается очень быстрый рост. Изменение величины  $\eta$  с понижением температуры описывается формулой

$$\eta = 0,74 e^{-0,11 t}, \quad (5)$$

где  $t$ —температура в °С, а  $\eta$  — коэффициент вязкости в пуазах.

Согласно данным опыта, резкое возрастание вязкости масла начинается при температуре ниже минус 30°C. Очевидно, что при сильном загустевании масла при этих температурах нужно ожидать значительного сопротивления движению траверсы ВМ и затягивания гашения дуги вязким маслом.

Представляет интерес вычислить, при каких же температурах наружного воздуха температура масла в баке достигнет значения минус 30°C.



Зависимость вязкости масла от температуры

Рис. 5

Подсчитывая по формуле (1), мы получаем, что в наших условиях установившаяся температура масла ВМ, нагруженного номинальным током, достигнет значения минус 30°C при температуре окружающего воздуха, равной минус 74°C. При наинизшей температуре окружающего воздуха минус 50°C установившаяся температура масла в баке ВМ будет равна минус 17°C. Вязкость масла при температуре минус 17°C, согласно формуле (5), будет в 6 раз больше, чем при 0°C.

Плотность масла также сильно зависит от температуры. Связь между величиной плотности масла и температурой представлена на рис. 5.

Как видно из рис. 5, плотность масла при понижении температуры возрастает по прямолинейному закону. Аналитическое выражение для этой зависимости можно представить формулой типа

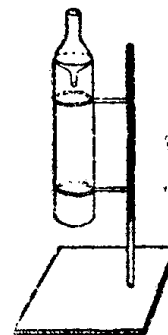
$$\delta = a - bt. \quad (6)$$

## Влияние качества смазочного материала на работу ВМ

С целью определения влияния качества материала, служащего для смазки трущихся частей привода (якорь соленоида, подшипники), было опробовано несколько видов смазочного материала. Выявлено, что на четкость работы выключателя и скорость переключения имеет большое влияние качество смазки. Таблица 1 подтверждает это положение.

Закключение о лучшем материале для смазки из числа исследованных из таблицы 1 очевидно.

Под температурой застывания смазки, отмеченной в таблице 1, понимается температура, при которой не происходит полного переключения



Вискозиметр Стокса

Рис. 4

Таблица 1

| №№<br>п. п. | Название смазочных<br>материалов | При $t = -20^{\circ}\text{C}$ |                            | Температура<br>застывания смазки |
|-------------|----------------------------------|-------------------------------|----------------------------|----------------------------------|
|             |                                  | Время отклю-<br>чения в сек.  | Время вклю-<br>чения в сек |                                  |
| 1           | „Пушечное сало“                  | 0,225                         | 0,18                       | $-38^{\circ}\text{C}$            |
| 2           | Солидол                          | 0,245                         | 0,19                       | $-34^{\circ}\text{C}$            |
| 3           | Тавот                            | 0,17                          | 0,16                       | ниже $-41^{\circ}\text{C}$       |

выключателя при подаче импульса тока на соленоид. Температура застывания тавота лежит ниже минус  $41^{\circ}\text{C}$ . При этой температуре работа выключателя и привода, смазанного тавотом, происходила четко.

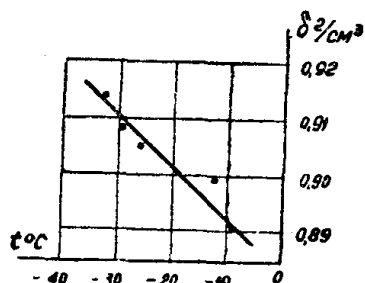
### Скорость и время движения траверсы ВМ в зависимости от температуры

Эти измерения были сделаны при помощи электромагнитного вибрографа весьма простой конструкции.

Измерение времени движения траверсы при включении ( $\tau_{\text{вк}}$ ) и отключении ( $\tau_{\text{отк}}$ ) в зависимости от температуры наружного воздуха (масла) представлено на рис. 6 и 7.

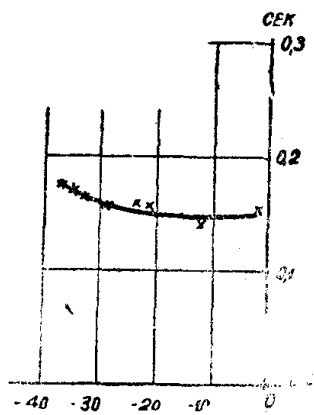
Из рис. 6 и 7 видно, что и  $\tau_{\text{вк}}$  и  $\tau_{\text{отк}}$  растут с понижением температуры. Зависимость на рис. 6 и 7 построена при смазке привода и выключателя тавотом и при напряжении оперативной цепи 220 в. С понижением температуры наблюдается увеличение времени движения.

Абсолютное увеличе-



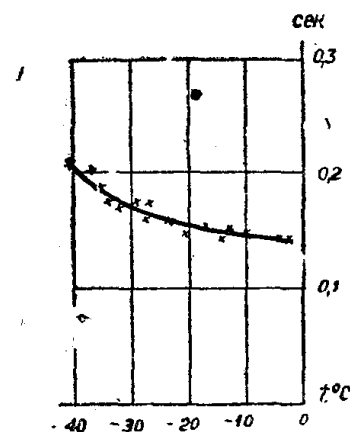
Зависимость плотности масла  $\delta$  от температуры.

Рис. 6



Зависимость собственного времени выключения от температуры для ВМ-35Н с ПС-20.

Рис. 7



Зависимость собственного времени отключения от температуры для ВМ-35Н с ПС-20.

Рис. 8

ние времени движения траверсы при отключении  $\tau_{\text{отк}}$  в интервале температур от нуля до температуры минус  $41^{\circ}\text{C}$  составляет 0,07 секунды, изменяясь от 0,145 при  $0^{\circ}\text{C}$  до 0,215 при  $-41^{\circ}\text{C}$ , т. е. на 50%.

Соответственно для  $\tau_{\text{вк}}$  имеем увеличение на 0,025" в интервале температур между нулем и минус  $36^{\circ}\text{C}$ ; при температуре  $0^{\circ}$   $\tau_{\text{вк}}$  составляет 0,150", а при  $36^{\circ}\text{C}$  — 0,175" (увеличение на 16%).

Таким образом, до температуры минус  $36^{\circ}\text{C}$  при включении и температуры минус  $41^{\circ}\text{C}$  при отключении изменение времени движения траверсы ВМ незначительно, и в наихудших условиях  $\tau_{\text{вк}}$  остается меньше времени, гарантированного для данного типа выключателя (0,25 сек.).

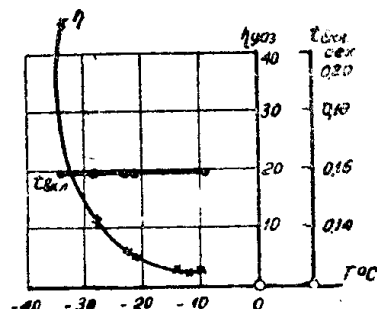
Представляет интерес сопоставить температурный ход  $\tau_{\text{вк}}$  и  $\tau_{\text{отк}}$  с температурным ходом вязкости масел. На рис. 8 нанесена зависимость  $\tau_{\text{вк}}$  и  $\tau_{\text{отк}}$  в зависимости от температуры.

Как видно из рис. 8, прямой зависимости между величиной  $\tau_{вк}$  и  $\eta$  нет, что следует считать вполне закономерным, так как в этом случае движение траверсы происходит под действием мощного усилия привода и им вполне определяется.

Значительно большего влияния вязкости масел следует ожидать на время отключения.

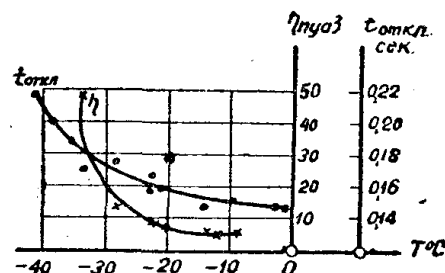
На рис. 9 представлена зависимость между величиной  $\tau_{отк}$  и температурой масла, а также величиной  $\eta$  и температурой.

Как видно из рис. 9, обе зависимости имеют одинаковый ход в интервале температур 0—30°C. Отсюда следует заключить, что в этом интер-



Зависимость  $\eta$  пуаз и  $\tau_{откл.}$  от температуры  $T^{\circ}\text{C}$ .

Рис. 9



Зависимость  $\eta$  пуаз и  $\tau_{откл.}$  сек. от температуры  $T^{\circ}\text{C}$ .

Рис. 10

вале температур время движения траверсы при отключении в значительной степени определяется вязкостью масла. Такой вывод был сделан также и А. К. Красиным [5], ранее промерявшим зависимость времени движения траверсы ВМ-14 от температуры при отключении. Зависимость  $\tau_{отк}$  для ВМ-35Н от вязкости масла представлена на рис. 10. Из рис. 10 видно, что рост  $\tau_{отк}$  отстает от увеличения вязкости масла. Зависимость  $\tau_{отк}$  от величины вязкости масла может быть еще больше ослаблена при увеличении силы, действующей при отключении.

По результатам наших опытов была построена зависимость между величиной максимальной скорости при переключениях и температурой. На рис. 11 представлена зависимость максимальной скорости движения траверсы при включении от температуры. Как видно из рис. 11, максимальная скорость при включении незначительно уменьшается при понижении температуры. В нашем случае это изменение характеризуется следующими величинами. При температуре минус 35°C максимальная скорость на 10%, ниже, чем максимальная скорость при температуре 0°C. Это положение находится в соответствии с вышеуказанной слабой зависимостью  $\tau_{вк}$  от температуры.

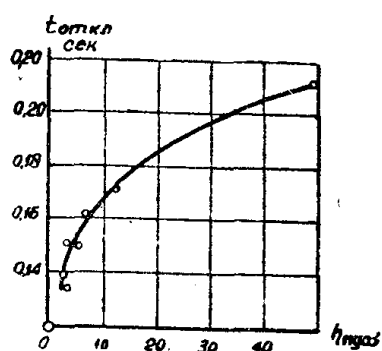
На рис. 12 представлена зависимость от температуры максимальной скорости движения траверсы при отключении. Наблюдается уменьшение скорости при понижении температуры и увеличение вязкости масла. При понижении температуры от нуля до минус 35°C скорость движения уменьшается на 26%, а при понижении температуры до -41°C скорость движения уменьшается на 30%. Из рассмотрения этих данных видно, что максимальная скорость при отключении с понижением температуры уменьшается медленнее, чем полное время движения траверсы.

Зависимость максимальной скорости движения от температуры, согласно нашим данным (рис. 12), может быть представлена формулой

$$V_{\max} = 2,7 + 0,5t, \quad (7)$$

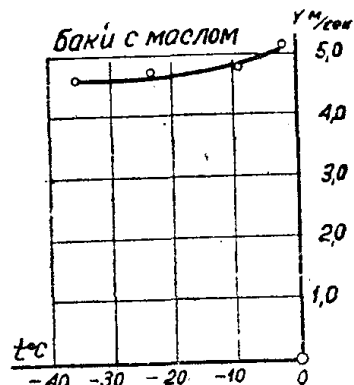
где  $V_{\max}$  — максимальная скорость движения траверсы при отключении в м/сек., а  $t$  — температура воздуха и масла в  $^{\circ}\text{C}$ .

Существенным является знание зависимости времени включения от напряжения на клеммах привода. Эта зависимость снималась нами при различных температурах. На рис. 13 и 14 приведены две характерные зависимости собственного времени включения от напряжения при температуре минус 18°C и минус 23°C. Привод и выключатель были смазаны та-



Зависимость времени отключения  $t_{\text{откл. сек.}}$  от вязкости масла  $\eta$  в паузах.

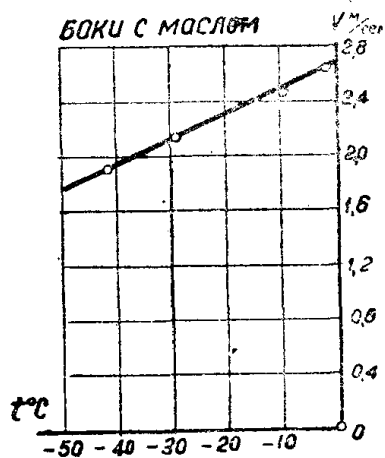
Рис. 11



Изменение максимальной скорости движения траверсы при включении в зависимости от температуры.

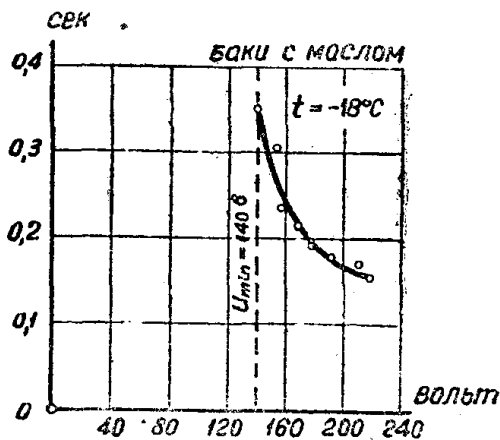
Рис. 12

вотом. При температуре минус 23°C в наших условиях работы минимальное включающее напряжение составляет 142 в. При напряжении на приводе, меньшем 142 в., включения не происходит совершенно. При напряжении на приводе в пределах от 142 до 60 вольт в 30% случаев работы соленоида не происходит включения выключателя. Таким образом, напря-



Изменение максимальной скорости движения траверсы при отключении в зависимости от температуры.

Рис. 13



Зависимость собственного времени выключения от напряжения.

Рис. 14

жение 160 вольт надо считать минимальным напряжением четкой работы выключателя при температуре воздуха минус 23°C

Определение минимального включающего напряжения при температуре выше минус 23°C показало незначительное уменьшение величины минимального включающего напряжения (до 138 вольт).

Значение минимального напряжения, соответствующего четкой работе выключателя при включении, равно 160 вольт. В табл. 2 приведены ре-

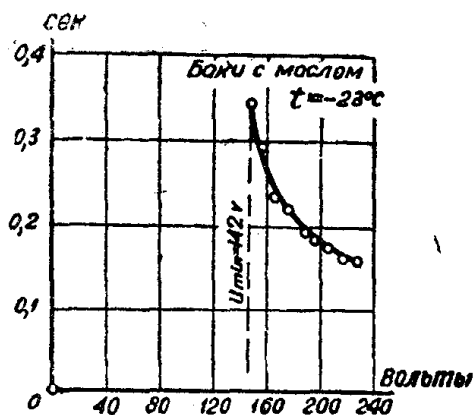
зультаты измерения минимального включающего напряжения при различных температурах.

Таблица 2

| №№<br>п. п. | Температура воздуха в °С | Минимальное<br>включающее<br>напряжение<br>в вольтах | Минимальное<br>напряжение<br>четкой работы<br>ВМ в вольтах | Время включения при<br>миним. включении на-<br>пряжения сек. |
|-------------|--------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| 1           | —5                       | 138                                                  | 180                                                        | 0,29                                                         |
| 2           | —16                      | 138                                                  | 160                                                        | 0,30                                                         |
| 3           | —18                      | 140                                                  | 160                                                        | 0,30                                                         |
| 4           | —21                      | 140                                                  | 160                                                        | 0,32                                                         |
| 5           | —23                      | 142                                                  | 160                                                        | 0,34                                                         |

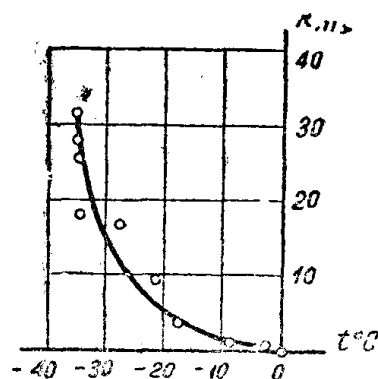
### Измерение сопротивления изоляции

Зависимость сопротивления изоляции привода при понижении температуры представлена на рис. 15. Здесь по оси абсцисс нанесена температура воздуха (изоляции), и по оси ординат—сопротивление изоляции в мегомах. Измерение сопротивления изоляции производилось с помощью гальванометра при напряжении 180 вольт постоянного тока. На рис. 15 точки, соответствующие температурной зависимости изоляции соленоида включения и выключения, практически совпадают. Точки, соответствующие



Зависимость собственного времени  
включения от напряжения.

Рис. 15



Зависимость сопротивления  
изоляции привода от температуры.

Рис. 16

щие сопротивлению изоляции цепи сигнализации, на чертеже отсутствуют, так как ее сопротивление на всем диапазоне температур оказалось бесконечно большим. Из рис. 15 следует, что сопротивление изоляции возрастает с понижением температуры, причем в интервале от минус 3°C до —35°C зависимость между этими величинами хорошо выражается формулой

$$R = 0,71 e^{-0,1t}, \quad (8)$$

де  $t$  — температура изоляции в °С, а  $R$  — сопротивление изоляции в мегомах.

### Закключение

В результате проведенных опытов следует, что при нагрузке ВМ рабочим током температура вблизи контактов сохраняет достаточно высокое значение.

В статье приводятся формулы для расчета теплового режима ВМ-35Н при некоторых условиях охлаждения.

Значительную опасность для нормальной работы ВМ представляет неудачный выбор смазки привода. В эксплуатации должно быть обращено соответствующее внимание на выбор смазки с нужными низкотемпературными свойствами и поддержание необходимой расчетной температуры привода. В статье приводятся данные, показывающие изменение времени движения траверсы при включении и отключении с изменением температуры.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Воробьев. Электрические станции. 2, 14, 1941.
  2. А. А. Воробьев, В. Н. Титов и Н. Б. Богданова. Отчет о работе „Испытание ВМ-35Н в условиях низких температур“. Томский индустриальный институт, 1941, ч. II.
  3. А. А. Воробьев и Н. А. Приходько. Электричество. 8, 66, 1940.
  4. Инж. В. Н. Титов, асп. Г. Е. Пухов и асп. В. А. Воробьев. Отчет о работе „Испытание ВМ-35Н в условиях низких температур“. Томский индустриальный институт, 1940, часть I.
  5. А. К. Красин. Электричество. 12, 52, 1939.
-