

## Показатели надёжности блоков частотной автоматики БМАЧР в цифрах и фактах.

Цифровой блок частотной разгрузки БМАЧР [1] стал первым серийным изделием, полностью разработанным и производимым в России<sup>1</sup>.

На объектах электроэнергетики до сих пор работают блоки, выпущенные НТЦ «Механотроника» ещё в 1995 году, т.е. проработавшие 15 лет, что составляет 180 месяцев, или 5400 дней или 129600 часов.

Всего за эти годы было выпущено 690 блоков серии БМАЧР ( $N_{\text{сум}}$ ), а среднегодовой выпуск  $N_{\text{ср}}$  (горизонтальная линия на рис. 1)<sup>2</sup> за весь период производства составил 46 блоков.

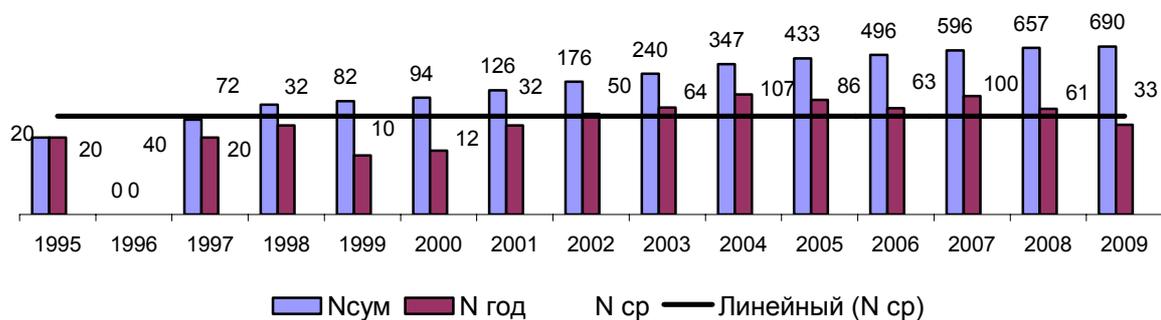


Рис. 1 Диаграмма выпуска блоков БМАЧР

Наибольшее число блоков было выпущено в 2004 ( $N_{\text{год}}=107$  шт) и в 2007 ( $N_{\text{год}}=100$  шт) годах.

За все годы выпуска внешний вид блока изменился незначительно, почти совсем не претерпела изменений и элементная база изделия. Как в начале производства, так и в последующие годы при изготовлении блока использовались практически только отечественные комплектующие элементы.

Столь длительный период выпуска изделия стал вызывать сложности с обеспечением производства комплектующими элементами, так как значительная часть радиоэлектронных компонентов уже снята с производства или их производство будет прекращено в ближайшее время. В связи с этим в 2009 году производство блоков БМАЧР было прекращено.

Завершение производства первого по времени разработки отечественного цифрового устройства релейной защиты, прекрасно зарекомендовавшего себя за 15 лет эксплуатации, позволяет подвести некоторые итоги, в том числе и вынести обоснованное суждение о фактической надёжности цифровых устройств.

За все 15 лет блоков БМАЧР изготовитель получил 40 претензий к их работе, причём первые претензии поступили только через пять лет после начала эксплуатации – в 1999 году (рис. 2).

<sup>1</sup> В разработке устройства принимал участие проф. Н.В. Гуров, Рига.

<sup>2</sup> В 1996 году не было выпущено ни одного изделия.



Рис. 2 Распределение количества претензий к блокам БМАЧР по годам

В соответствии с рекомендациями стандарта [2] из указанного количества претензий только 35 были признаны производителем обоснованными, из чего следует, что к работе блоков предъявлялось в среднем 2,3 претензии в год (горизонтальная линия  $r_{cp}$  на рис. 2). Повторных претензий к работе блоков не предъявлялось. Большинство из выпущенных блоков БММРЧ не имели ни одной претензии по своей работе за все годы эксплуатации.

Здесь необходимо отметить, что 8 из 12 претензий, высказанных к работе блоков БМАЧР в 2009 году, относятся к партии изделий, направленных в адрес одного потребителя. Они были выявлены одновременно и оказались одинаковы для всех 8 блоков. Фактически эта претензия не имеет отношения к надежности изделия, поэтому будем считать эти 8 претензий как одну.

В итоге всего к работе блоков БМАЧР за 15 лет, прошедших с момента передачи первого блока в эксплуатацию, было предъявлено только 28 претензий, в среднем по 1,86 претензии в год (горизонтальная линия  $r_{cp}$  на рис. 3). При этом в любом году никогда не предъявлялось более 5 претензий.



Рис. 3 Уточненное распределение количества претензий к блокам БМАЧР по годам

Однако с помощью такого показателя (отношение количества претензий к числу блоков), даже при учёте всего парка выпущенных изделий, нельзя охарактеризовать ни один из показателей надежности блока БМАЧР.

Для корректного определения показателей надежности блока БМАЧР в соответствии с рекомендациями, изложенными в стандарте [3], используем другую характеристику – интенсивность отказов  $\lambda$ .

Для определения этой характеристики необходимо знать изменение

наработки всей совокупности блоков ***T<sub>сум</sub>*** на момент предъявления 1, 5, 10 и т.д. претензии (рис. 4).

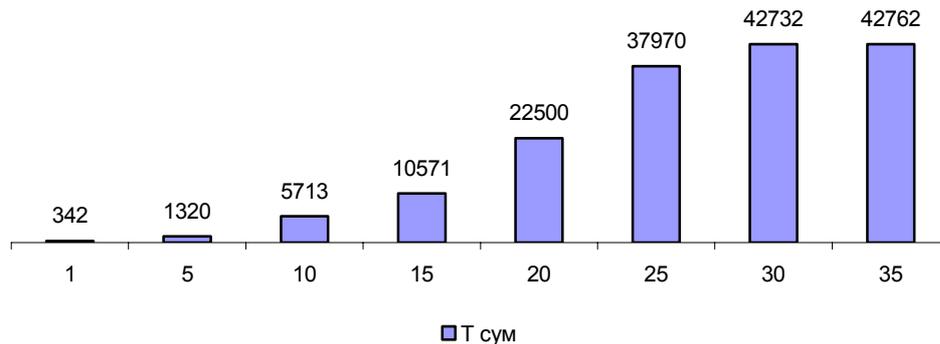


Рис. 4 Значение суммарной наработки на момент предъявления *i*-ой претензии

На основании известных значений суммарной наработки ***T<sub>сум</sub>*** интенсивность отказов ***λ*** для указанных точек рассчитывалась по формуле, приведенной в [3]:

$$\lambda = d/T_{\text{сум}}, \text{ мес}^{-1}.$$

Результаты расчетов отображены на диаграмме (рис. 5).

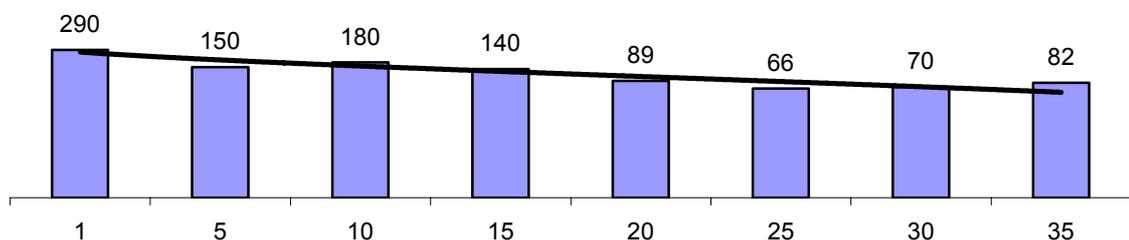


Рис. 6 Изменение расчетного значения интенсивности отказов ( $\lambda \cdot 10^5, \text{ мес}^{-1}$ ) к моменту предъявления *i*-ой претензии

Для всей совокупности 690 выпущенных блоков БМАЧР при 35 предъявленных к ним претензиях интенсивность отказов составила:

$$\lambda = d/T_c = 35/42821 = 0,00082 \text{ месяц}^{-1}.$$

Если же для этого же количества выпущенных блоков рассматривать только 28 претензий (см. текст к рис. 3) интенсивность отказов составит  $0,00065 \text{ месяц}^{-1}$ , т.е. уменьшится примерно на 20%, пропорционально произведенному уменьшению числа претензий.

Для информации ниже приведён перечень элементов, отказ которых стал причиной претензии к работе блоков БМАЧР за прошедшие годы:

- варистор – 5 случаев;
- предохранитель – 5 случаев;<sup>3</sup>

<sup>3</sup> Предохранитель сгорает при отказе варистора, предотвращая дальнейшие повреждения в цепях питания

резистор – 1 случай;  
 микросхемы – 2 случая;  
 выходные реле – 2 случая;  
 конденсатор – 5 случаев (1 случай отказа конденсатора типа К50 зафиксирован после 10 лет эксплуатации);  
 кнопки клавиатуры – 5 случаев;  
 резонатор (кварцевый) – 2 случая.

Отказы варисторов в новых изделиях прекратились, когда в 2004 году произвели замену этих элементов на импортные.

Справедливости ради надо отметить, что в 2009 году в блоке выпущенном 2002 году был зафиксирован отказ варистора отечественного производства, отработавшего 81 месяц [58320 часов, что в 3,24 раза больше наработки на отказ, указанной в документации на блок БМАЧР (18000 часов)].

К причинам, вызвавшим претензии к работе блоков БМАЧР следует отнести также 2 случая холодной пайки, приведшие к отказу блоков после некоторого периода эксплуатации.

Второй показатель надежности, который можно определить на основании информации, полученной от потребителя – **наработка на отказ**. Подобный подход рекомендован и в работе [3].

Сначала приведем график изменения суммарной наработки блоков  $T_{\text{сум}}$  в зависимости числа находящихся в эксплуатации блоков  $N$  (рис. 7)<sup>4</sup>.

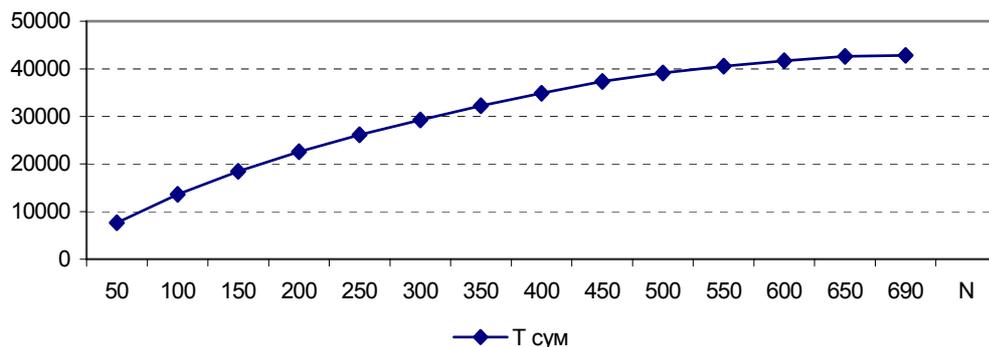


Рис. 7 График изменения суммарной наработки блоков БМАЧР

Естественно, что изменение суммарной наработки связано с изменением числа блоков БМАЧР, находящихся в эксплуатации (ср. с рис.1).

На основании данных, полученных от эксплуатирующих предприятий, средняя наработка на один блок для всей выборки блоков БМАЧР составила:

$$T_{\text{ср}} = 42821/690 = 62 \text{ мес}$$

Это значение  $T_{\text{ср}}$  соответствует 44 640 часам, что превышает установленное в документации на блок БМАЧР значение  $T_0$  в 2,48 раза.

Если суммарная наработка всего массива блоков БМАЧР непрерывно возрастала, то наработка на один блок БМАЧР постепенно уменьшалась от

<sup>4</sup> График изменения суммарной наработки блоков составлен для групп по 50 блоков в связи с большим количеством эксплуатируемых блоков.

153 месяцев для 50-ти блоков до 62 месяцев для всей выборки из 690 бло-ков (рис. 8).

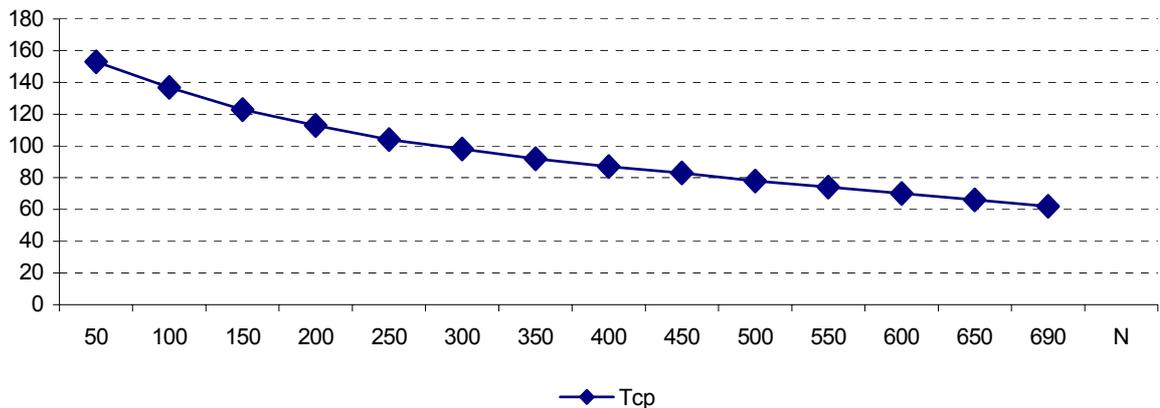


Рис. 8 График изменения средней наработки на блок БМАЧР

Изменение наработки на один блок описывается формулой:

$$T_{cp} = - 35,332 \ln (N) + 159,29$$

при достоверности аппроксимации  $R^2 = 0,9902$ .

Для суждения о надежности изделия важны не только приведенная наработка на один блок, рассчитанная для всего массива изделий, находящихся в эксплуатации, (рис. 8), но и наработка на отказ, рассчитанная для тех блоков, к работе которых были высказаны те или иные претензии в соответствующем году (рис.9).

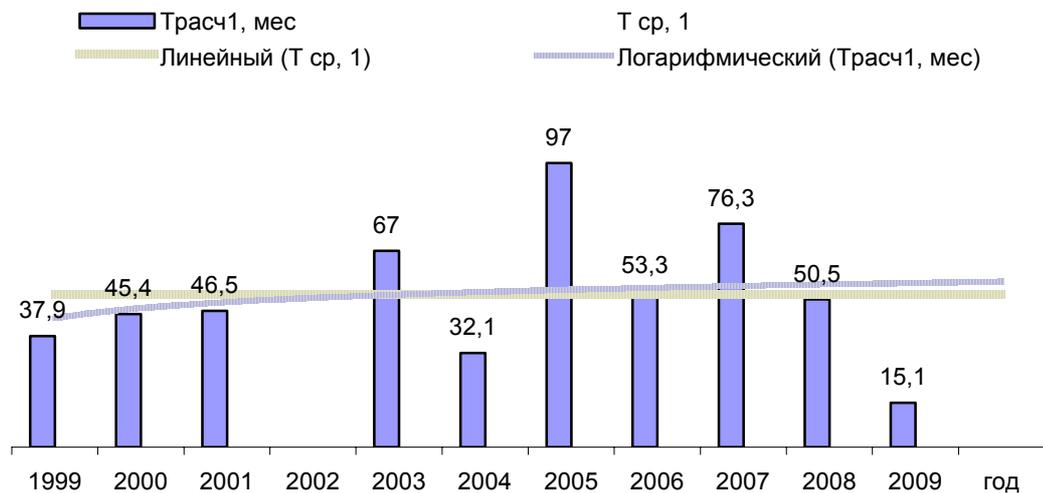


Рис. 9 Изменение по годам наработки на отказ блоков БМАЧР, к работе которых были предъявлены претензии

Линия тренда (график **Трасч1**), проведенная на рис. 9 показывает увеличение средней наработки на отказ **T<sub>ср</sub>** по годам эксплуатации.

В соответствии с расчетами, среднее значение наработки на отказ **T<sub>ср</sub>** блоков, к работе которых были предъявлены претензии, составило

52,1 месяца, что соответствует 1563 дням или 37512 часам (горизонтальная линия на рис. 9).

Полученное таким образом значение наработки на отказ более, чем в два раза, превышает значение, указанное в технических условиях на блок БМАЧР – 18000 часов.

Для окончательной оценки значения наработки на отказ блоков БМАЧР был применен метод контрольных испытаний на надежность с восстановлением объектов, основанный на рекомендациях стандарта [2]. Применение этого метода для других изделий описано в статьях [3, 4].

Для получения адекватных результатов число блоков, находящихся в эксплуатации в тот или иной момент времени, должно быть не меньше определенного по формуле:

$$N_{min} = T_{max}/t_i \quad (1)$$

где  $T_{max}$  - предельная суммарная наработка  
 $t_i$  - продолжительность испытаний.

Значение  $T_{max}$  рассчитывается с использованием соотношений, приведенных в табл. 4 стандарта [2] в зависимости от:

- предельного числа претензий  $r_{пр}$ , предъявленных к работе блоков;
- приёмочного значения наработки на отказ  $T_{\beta}$ ;
- нормированного значения наработки на отказ  $T_H$ ;
- риска поставщика  $\alpha$ ;
- риска потребителя  $\beta$ .

На рис. 10 показаны расчёты для  $\alpha = \beta = 0,05$  и двух значений наработки на отказ  $T_{\beta} = T_H = 50000$  ч при  $t_i = 69,5$  месяцев (нижняя линия) и  $T_{\beta} = T_H = 100000$  ч при  $t_i = 130$  месяцев (верхняя линия).

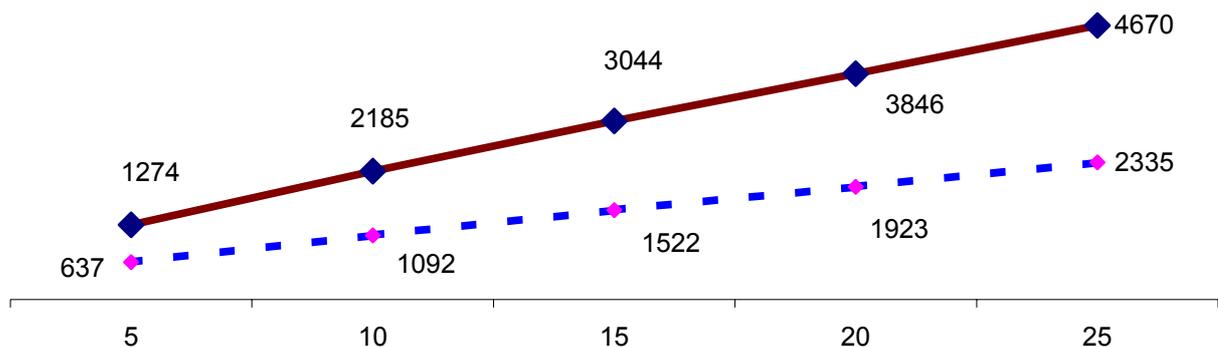


Рис. 10 Значения  $T_{max}$  в зависимости от  $r_{пр}$ :

$T_{\beta} = T_H = 100000$  ч (139 месяцев) – верхняя линия

$T_{\beta} = T_H = 50000$  ч (69,5 месяца) – нижняя линия

На основании данной информации и формулы (1) была определена зависимость минимального числа блоков  $N_{min}$  (рис. 11), находящихся в эксплуатации, от предельного числа отказов для двух значений  $T_{\beta} = T_H = 50000$  ч (нижняя линия) и  $T_{\beta} = T_H = 100000$  ч (верхняя линия).

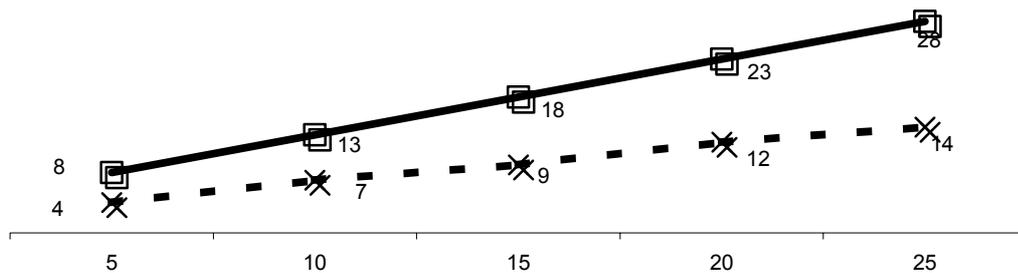


Рис. 11 Зависимость минимального числа блоков от предельного числа отказов  $r_{пр}$

Таким образом оказывается, что даже для подтверждения наработки на отказ  $T_n = 100000$  ч достаточно, чтобы наблюдение проводилось над блоками, количество которых находится в диапазоне от 8 (для предельного числа отказов  $r_{пр} = 5$ ) до 28 блоков (для предельного числа отказов  $r_{пр} = 25$ ).

Для иллюстрации графики на рис. 12 показано изменение фактического числа блоков БМАЧР, находящихся в эксплуатации (верхняя линия), и расчетного значения минимально необходимого количества блоков (нижняя линия) в зависимости от предельного числа отказов  $r_{пр}$ .

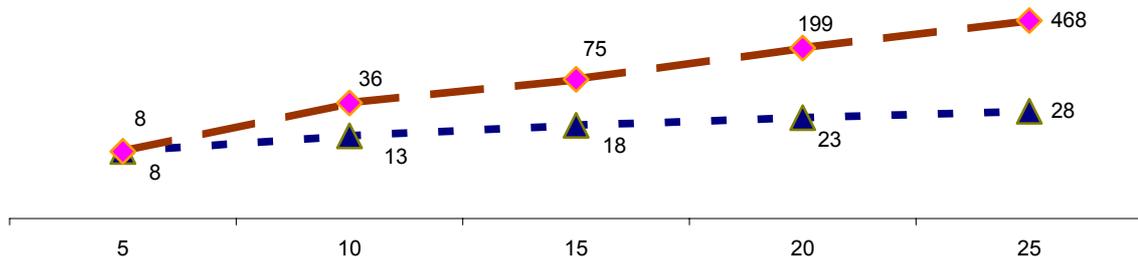


Рис. 12 Минимальное (нижняя линия) и фактическое (верхняя линия) количество блоков БМАЧР, находящихся в эксплуатации, к моменту получения  $i$ -ой претензии

Как показывают графики, только для  $r_{пр} = 5$  минимально требуемое количество блоков совпало с числом блоков БМАЧР, фактически находившимися в эксплуатации.

Во всех остальных случаях, количество блоков БМАЧР, находившихся в эксплуатации, значительно превышало минимально необходимое по рекомендациям стандарта [2].

Отметим, что продолжительность испытаний для всей выборки (690 блоков БМАЧР) составила 170 месяцев – от даты ввода в эксплуатацию первого блока БМАЧР до 01.12.2009.

Для оценки наработки на отказ по данным, полученным от эксплуатирующих предприятий, были построены графики фактического изменения суммарной наработки в зависимости от числа предъявленных претензий (верхняя линия на рис. 13) и расчетного изменения  $T_{max}$  от предельного значения  $r_{пр}$  (нижняя линия на рис. 13) для  $T_{\beta} = T_n = 100000$  ч.

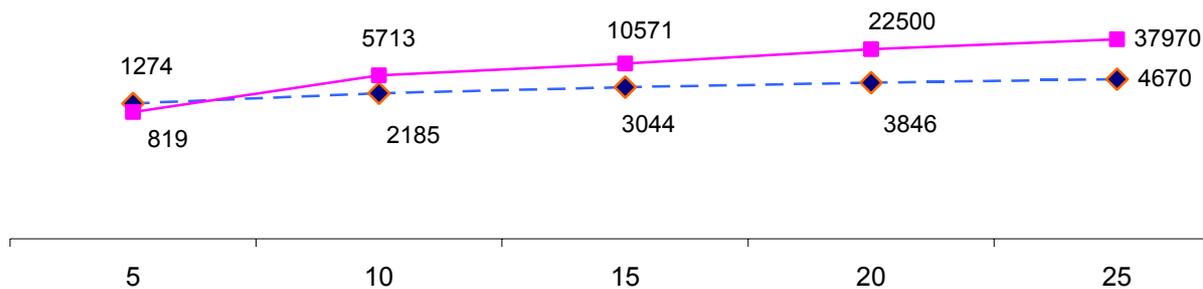


Рис. 13 Изменение  $T_{max}$  и суммарной наработки блоков БМАЧР при  $T_n = 100000$  ч

При предельном числе отказов  $r_{пр} = 5$  суммарная наработка блоков БМАЧР (819 месяцев) меньше, чем расчетное значение  $T_{max}$  для  $T_n = 100000$  ч. Опираясь на полученные расчетным путём значения можно предположить, что средняя наработка на отказ блоков БМАЧР превышает 50000 час, так как суммарная наработка блоков БМАЧР, определенная по результатам информации, полученной от эксплуатирующих предприятий, всегда превышает расчетное значение  $T_{max}$  для  $T_n = 50000$  ч.

Всё это позволяет сделать один принципиальный для оценки надежности блоков БМАЧР вывод:

– **средняя наработка на отказ превышает 50000 ч.**

Рассмотрим теперь причины претензий к работе блоков БМАЧР. В первых по времени выпусках блоках БМАЧР в модуле питания были применены варисторы отечественного производства, невысокая надежность которых привела к отказу модулей питания в трёх блоках. После замены этого элемента на варистор импортного производства отказы блоков БМАЧР по этой причине не повторялись.

В перечне элементов, приведших к отказам блоков БМАЧР (см. выше) указаны отечественные резисторы и конденсаторы. Произведенная замена этих комплектующих элементов на импортные исключило повторение таких претензий к работе блоков БМАЧР.

Практически единственный элемент к работе которого было несколько замечаний, оставленный в блоке БМАЧР без замены до окончания производства – кнопки клавиатуры для навигации по меню. Тем не менее, из-за нарушения работы контактов кнопок было предъявлено всего 5 претензий за весь период эксплуатации, причём работоспособность кнопок восстанавливалась после их очистки.

В связи с тем, что даже после снятия с производства в эксплуатации осталось 690 блоков БМАЧР, была произведена оценка возможного количества претензий до истечения срока службы всех выпущенных изделий.

При расчетах предполагалось, что каждый год из-за окончания срока службы из эксплуатации будет выведено такое количество блоков, которое было введено 15 лет назад (нижний график на рис. 14) и на основании этого рассчитывалась наработка оставшихся в эксплуатации блоков (верхний график на рис. 14).

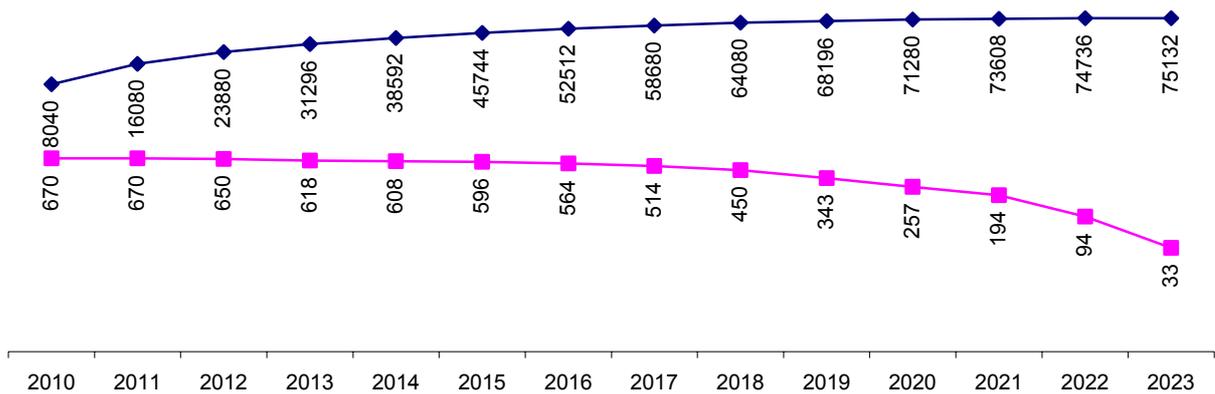


Рис. 14 Изменение количества блоков БМАЧР (нижняя линия) и их наработки (верхняя линия) до 2023 года

Расчётные данные показывают, что до истечения срока службы всех выпущенных блоков БМАЧР их суммарная наработка составит 75132 месяца.

Предполагая, что рассчитанное по данным эксплуатации значение интенсивности отказов  $\lambda$  останется неизменным, можно оценить ожидаемое количество претензий  $P$  за последующие 15 лет:

$$62 > P > 49$$

Значительное увеличение ожидаемого количества претензий по сравнению с полученными на 01.12.2009 вызвано тем, что предполагаемая наработка блоков БМАЧР в 1,75 превысит суммарную наработку блоков БМАЧР до 01.12.2009 (42821 мес) и составит 75132 месяца.

Опыт ремонта возвращенных за все предыдущие годы блоков БМАЧР показал, что держать в запасе съёмные модули нет необходимости.

Примененный в этом изделии навесной монтаж позволяет произвести ремонт заменой отказавших элементов подобного типа.

Запас комплектующих элементов на весь оставшийся период эксплуатации необходимо поддерживать только для газосветных индикаторов и кнопок, применение которых в других изделиях прекращено.

Выводы.

1. Анализ данных эксплуатации блоков БМАЧР доказал высокую надежность этих цифровых устройств производства НТЦ «Механотроника»
2. Подтвержденное расчетно-экспериментальными методами значение средней наработки на отказ превысило регламентированное в технических условиях значение не менее, чем в два раза.

### Литература

1. Александров В.Ф., Езерский В.Г., Захаров О.Г., Малышев В.С. Частотная разгрузка в энергосистемах. В 2 ч. М.: НТФ «Энергопрогресс», 2007 [Библиотечка электротехника, приложение к журналу «Энергетик», вып. 8 (104), 9 (105)].

2. ГОСТ 27.410-87. Надежность в технике. Методы контроля показателей надежности и планы контрольных испытаний на надежность. М.: Издательство стандартов, 2000.
3. Дворин В.М. Оценка показателей надежности радиоэлектронных систем. // Радиотехника, 1999, №1, С.87
4. Гондуров С.А., Захаров О.Г. Определение наработки на отказ по результатам эксплуатации. // Вести в электроэнергетике, №1, 2010, С. 22.
5. Надежность, доказанная временем // Материал размещен на странице: <http://bmrz-zakharov.narod.ru/new/vremja.var3.pdf>
6. РД 34.35.310-97. Общие технические требования к микропроцессорным устройствам защиты и автоматики энергосистем. М. ОРГРЭС, 1997.