

Надёжность блоков частотной автоматики БМАЧР в цифрах и фактах

С.А. Гондуров, О.Г. Захаров (Санкт-Петербург)

Цифровой блок частотной разгрузки БМАЧР [1] стал первым серийным изделием, полностью разработанным и производимым в России¹.

На объектах электроэнергетики до сих пор работают блоки, выпущенные НТЦ «Механотроника» ещё в 1995 г., т.е. проработавшие 15 лет, что составляет 180 мес., или 5400 дней, или 129 600 ч.

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

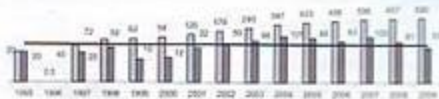


Рис. 1. Диаграмма выпуска блоков БМАЧР:

— $N_{\text{сум}}$; — $N_{\text{год}}$

Наибольшее число блоков было выпущено в 2004 г. ($N_{\text{год}} = 176$ шт.) и в 2007 г. ($N_{\text{год}} = 290$ шт.)

¹ В разработке устройства принимал участие проф. Н.В. Гуров (Рига).

² В 1996 г. не было выпущено ни одного изделия.

За все годы выпуска внешний вид блока изменился незначительно, почти совсем не претерпел 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 или уже снята с производства или их производство будет прекращено в ближайшее время. В связи с этим с 2009 г. блоки БМАЧР перестали выпускаться.

Завершение производства первого отечественного цифрового устройства релейной защиты, прекращено зарекомендовавшего себя за 15 лет эксплуатации, позволяет подвести некоторые итоги, в том числе и в плане обоснованное суждение о фактической надежности цифровых устройств.

За все 15 лет изготовитель блоков БМАЧР получил 40 претензий к их работе, причём первые претензии поступили только через 5 лет после начала эксплуатации — в 1998 г. (рис. 2).



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 на рис. 2). Повторных претензий к работе блоков не предъявлялось. Большинство из вышесказанных блоков БМАЧР 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 г., относятся к партии изделий, направленных в адрес одного потребителя. Они были выявлены одновременно и оказались одинаковыми для всех восьми блоков. Фактически эти претензии не имеют отношения к надежности изделия, поэтому будем считать эти восемь претензий как одну.

Витое к работе блоков БМАЧР за 15 лет, прошедших с момента передачи первого блока в эксплуатацию, всего было предъявлено только 20 претензий, в среднем по 1,86 претензии в год (горизонтальная линия на рис. 3). При этом в любом году никогда не предъявлялось более пяти претензий.

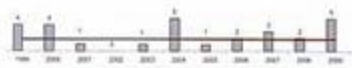


Рис. 3. Уточненное распределение количества претензий к блокам БМАЧР по годам

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

Для корректного определения показателя надёжности блока БМАЧР в соответствии с рекомендациями, изложенными в стандарте [3], используем другую характеристику — интенсивность отказов λ .

Для определения этой характеристики необходимо знать изменение наработки всей совокупности блоков T_{Σ} на момент предъявления 1, 5, 10-й и других претензий (рис. 4).

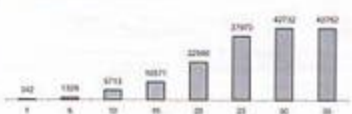


Рис. 4. Значение суммарной наработки T_{Σ} на момент предъявления i -й претензии

На основании известных значений суммарной наработки T_{Σ} интенсивность отказов λ , мес⁻¹, для указанных точек рассчитывалась по формуле, приведенной в [3]:

$$\lambda = d/T_{\Sigma}$$

Результаты расчетов отображены на рис. 5.

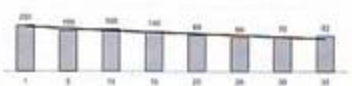


Рис. 5. Изменение расчетного значения интенсивности отказов ($\lambda \cdot 10^3$, мес⁻¹) к моменту предъявления i -й претензии

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

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

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

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

- варистор — пять случаев;
- предохранитель — пять случаев;¹
- резистор — один случай;
- микросхемы — два случая;
- выходные реле — два случая;
- конденсатор — пять случаев (один случай отказа конденсатора типа К50 зафиксирован после 10 лет эксплуатации);
- клавиатура — пять случаев;
- резонатор (кварцевый) — два случая.

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

Справедливости ради надо отметить, что в 2009 г. в блоке, выпущенном в 2002 г., был зафиксирован отказ варистора отечественного производства, отработавшего 81 мес. (58 320 ч, что в 3,24 раза больше наработки на отказ, указанной в документации на блок БМАЧР (18 000 ч).

К причинам, вызвавшим претензии к работе блоков БМАЧР следует отнести также два случая холодной пайки, приведших 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 [3].

Сначала приведем график изменения суммарной наработки блоков T_{Σ} в зависимости числа находящихся в эксплуатации блоков N (рис. 6)².

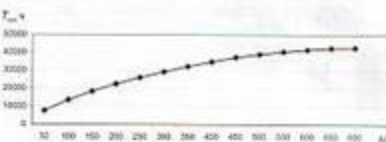


Рис. 6. График изменения суммарной наработки блоков БМАЧР

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

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

$$T_{cp} = 42\,821/690 = 62 \text{ мес.}$$

Это значение соответствует 44 640 ч, что превышает установленное в документации на блок БМАЧР значение в 2,48 раза.

Если суммарная наработка всего массива блоков БМАЧР непрерывно возрастала, то наработка на один блок БМАЧР постепенно уменьшалась: от 153 мес. для 50 блоков до 62 мес. для всей выборки из 690 блоков (рис. 7).

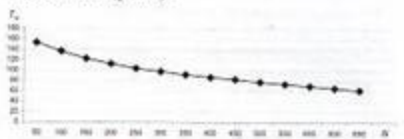


Рис. 7. График изменения средней наработки на блок БМАЧР

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, но и наработка на отказ, рассчитанная для тех блоков, к работе которых были высказаны те или иные претензии в соответствующем году (рис. 8).

Линия тренда 2, показывая увеличение средней наработки на отказ T_{cp} по годам эксплуатации.

В соответствии с расчетами, среднее значение наработки на отказ T_{cp} блоков, к работе которых были предъявлены претензии, составило 52,1 мес., что соответствует 1563 дням, или 37 512 ч (горизонтальная линия на рис. 8).

¹ Предохранитель сгорает при отказе варистора, предотвращая дальнейшее повреждение в цепях питания.
² График изменения суммарной наработки блоков составлен для групп по 50 блоков в связи с большим количеством эксплуатируемых блоков.

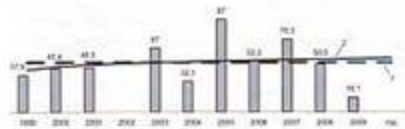


Рис. 8. Изменение по годам выработки на отказ блоков БМАЧР, к работе которых были предъявлены претензии: — T_{max} , мес; $1 - T_{cp}$; 2 — логарифмический тренд (T_{trend} , мес)

Полученное таким образом значение выработки на отказ более чем в 2 раза превышает значение, указанное в технических условиях на блок БМАЧР, — 18 000 ч.

Для окончательной оценки значения выработки 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 [3, 4].

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

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

где T_{max} — предельная суммарная выработка; t_{cp} — продолжительность испытаний.

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

- предельного числа претензий $r_{пр}$, предъявляемых к работе блоков;
- приемочного значения выработки на отказ T_{cp} ;
- нормированного значения выработки на отказ T_{cp} ;
- риска поставщика α ;
- риска потребителя β .

На рис. 9 показаны расчеты для $\alpha = \beta = 0,05$ и двух значений выработки на отказ $T_{cp} = T_n = 50000$ ч (69,5 мес) при $t_n = 69,5$ мес (нижняя линия) и $T_{cp} = T_n = 100000$ ч (139 мес) при $t_n = 130$ мес (верхняя линия).

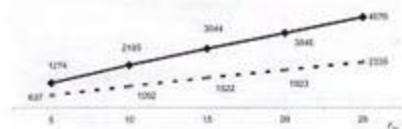


Рис. 9. Значения T_{max} в зависимости от предельного числа отказов $r_{пр}$

На основании данной информации и формулы (1) была определена зависимость минимального числа блоков N_{min} (рис. 10), находящихся в эксплуатации, от предельного числа отказов ($r_{пр}$) для двух значений $T_{cp} = T_n = 50000$ ч (нижняя линия) и $T_{cp} = T_n = 100000$ ч (верхняя линия).



Рис. 10. Зависимость минимального числа блоков от предельного числа отказов $r_{пр}$

Таким образом оказывается, что даже для подтверждения выработки на отказ $T_n = 100000$ ч достаточно, чтобы наблюдение проводилось над блоками, число которых находится в диапазоне от 6 (для $r_{пр} = 5$) до 28 блоков (для $r_{пр} = 25$).

Для иллюстрации на рис. 11 показано изменение фактического числа блоков БМАЧР, находящихся в эксплуатации и расчетного минимально необходимого числа блоков в зависимости от предельного числа отказов.



Рис. 11. Минимальное (нижняя линия) и фактическое (верхняя линия) количество блоков БМАЧР, находящихся в эксплуатации, к элементу получения i -й претензии

Как показывают графики, только для $r_{пр} = 5$ минимально требуемое количество блоков совпало с числом блоков БМАЧР, фактически находящихся в эксплуатации. Во всех остальных случаях, число блоков БМАЧР, находящихся в эксплуатации, значительно превышало минимально необходимое по рекомендациям стандарта [2].

Отметим, что продолжительность испытаний для всей выборки (690 блоков БМАЧР) составила 170 мес. — от даты ввода в эксплуатацию первого блока БМАЧР до 01.12.09.

Для оценки выработки на отказ по данным, полученным от эксплуатирующих предприятий, были построены графики фактического изменения суммарной выработки в зависимости от числа предъявленных претензий (верхняя линия на рис. 12) и расчетного изменения T_{max} от предельного

значения (нижняя линия на рис. 12) для $T_f = T_n = 100\,000$ ч.

При предельном числе отказов $r_{\text{пред}} = 5$ суммарная наработка блоков БМАЧР (819 мес.) меньше, чем расчетное значение T_{max} для $T_n = 100\,000$ ч. Опираясь на полученные расчетам путём значения, можно предположить, что средняя наработка на отказ блоков БМАЧР превышает 50 000 ч, так как суммарная наработка блоков БМАЧР, определенная по результатам информации, полученной от эксплуатирующих предприятий, всегда превышает расчетное значение T_{max} для $T_n = 50\,000$ ч.

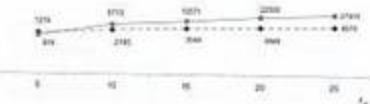


Рис. 12. Изменение T_{max} и суммарной наработки блоков БМАЧР при $T_n = 100\,000$ ч

Всё это позволяет сделать один принципиальный для оценки надежности блоков БМАЧР вывод: **средняя наработка на отказ превышает 50 000 ч.**

Рассмотрим теперь причины претензий к работе блоков БМАЧР. В первых по времени выпусках блока 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 варисторы 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 комплекующих элементов на импортные исключило повторение претензий к работе блоков БМАЧР.

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

В связи с тем, что даже после снятия с производства в эксплуатацию 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, и на основании этого рассчитывалась наработка оставшихся в эксплуатации блоков (рис. 13).

Расчётные данные показывают, что до истечения срока службы всех выпущенных блоков БМАЧР их суммарная наработка составит 75 132 мес.

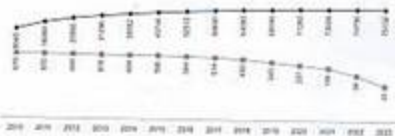


Рис. 13. Изменение количества блоков БМАЧР (нижний график) и их наработки (верхний график) до 2023 г.

Предполагая, что рассчитанное по данным эксплуатации значение интенсивности отказов λ останется неизменным, можно оценить ожидаемое число претензий P за последующие 15 лет:

$$49 < P < 62.$$

Значительное увеличение ожидаемого числа претензий по сравнению с полученными на 01.12.09 вызвано тем, что предполагаемая наработка блока БМАЧР в 1,75 превышает суммарную наработку блоков БМАЧР до 01.12.09 (42 821 мес.) и составит 75 132 мес.

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

Используемый 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 «Мехатроника».
2. Подтвержденное расчетно-экспериментальными методами значение средней наработки на отказ превысило регламентированное в технических условиях значение не менее, чем в 2 раза.

Литература

1. Частотная разгрузка в энергосистемах. В 2 ч./В.Ф. Александров, В.Г. Езерский, О.Г. Захаров и др. 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.: Изд-во стандартов, 2000.

3. Дворни 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://beniz-zakharov.narod.ru/new/vremja.vaf3.pdf>.

6. РД 34.35.310-97. Общие технические требования к микропроцессорным устройствам защиты и автоматики энергосистем. М.: ОРГРЭС, 1997.