УДК 658.26.621.311

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ БЕЗОТКАЗНУЮ РАБОТУ

[1,2]Хисматуллин А.С., [1]Хисматуллин А.Г., [1]Буланкин Е.И., [1]Камалов А.Р.

[1]Филиал «Уфимский государственный нефтяной технический университет» в г. Салавате;
[2]ГАНУ «Институт прикладных исследований Республики Башкортостан», Стерлитамак, e-mail: hism5az@mail.ru

Задача обеспечения надежности систем электроснабжения включает в себя целый комплекс технических, экономических и организационных мероприятий, направленных на сокращение ущерба от нарушения нормального режима работы потребителей электроэнергии; обеспечение заданных технических и эксплуатационных характеристик работы потребителей; разработка наиболее рациональной, с точки зрения обеспечения надежности, программы эксплуатации системы. Кроме того, в современных рыночных условиях надежность электроснабжения неразрывно связана с экономическими показателями и энергетической безопасностью промышленных предприятий. Таким образом, целью нашей работы является исследование экономических факторов надежности систем электроснабжения и сбор информации об анализе и синтезе систем электроснабжения по заданному уровню надежности. Результаты работы позволят повысить уровень показателей надежности систем электроснабжения, что положительным образом скажется на безотказной работе систем электроснабжения.

Ключевые слова: надежность электроснабжения, отказы, внезапные отказы, постепенные отказы, сбои, перемежающиеся отказы, причины отказов

MATHEMATICAL MODELING OF SYSTEMS PROVIDING POWER UPTIME

[1,2]Hismatullin A.S., [1]Hismatullin A.G., [1]Bulankin E.I., [1]Kamalov A.R.

[1]Ufa State Petroleum Technological University Salavat Branch, Salavat;
[2]The state independent scientific institution «Institute of applied researches of Republic Bashkortostan», Sterlitamak, e-mail: hism5az@mail.ru

The task of ensuring the reliability of power supply includes a whole range of technical, economic and organizational measures aimed at reducing the damage caused by violations of normal operation of electricity consumers; provision of required technical and operational characteristics of the work of consumers; the development of the most efficient in terms of reliability, the Operating System. In addition, the current market conditions the reliability of power is inextricably linked to economic performance and energy security of industrial enterprises. Thus, the purpose of our work is to study the economic factors, the reliability of power supply and collection of information on the analysis and synthesis of power supply systems for a given level of reliability. The results will help improve the performance reliability of power supply systems that will positively affect the uptime of power supply systems.

Keywords: reliability of power supply, failure, sudden failures, phasing, failures, intermittent failures, the reasons for failure

Обеспечение надежности является одной из важнейших проблем при создании и эксплуатации любой технической системы. Особенно актуальна она для сложных систем, таких как системы электроснабжения, состоящих из большого числа элементов и имеющих обширные внутренние и внешние связи.

Задача обеспечения надежности систем электроснабжения включает в себя целый комплекс технических, экономических и организационных мероприятий, направленных на сокращение ущерба от нарушения нормального режима работы потребителей электроэнергии; обеспечение заданных технических и эксплуатационных характеристик работы потребителей; разработка наиболее рациональной, с точки зрения обеспечения надежности, программы эксплуатации системы. Кроме того, в современных рыночных условиях надежность электроснабжения неразрывно связана с экономическими показателями и энергетической безопасностью промышленных предприятий.

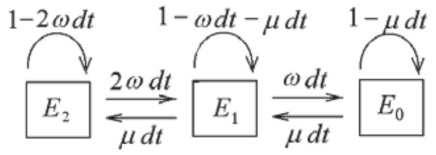

Рис. 1. Модель надежности дублированной системы с постоянным замещением и ограниченным восстановлением

Поэтому создание новых систем электроснабжения требует применения новых методов анализа, расчета и прогнозирования надежности для повышения уровня надежности систем электроснабжения.

RETRACTED

При постоянном резервировании и ограниченном восстановлении система может находиться в трех состояниях: E_2 – работоспособны оба элемента; E_1 – работоспособен только один из элементов; E_0 – оба элемента неработоспособны. Граф переходов из одного состояния в другое изображен на рис. 1.

Система дифференциальных уравнений для вероятностей состояний имеет вид:

$$\left.\begin{aligned} \frac{dP_2(t)}{dt} &= -2\cdot\omega\cdot P_2(t)+\mu\cdot P_1(t);\\ \frac{dP_1(t)}{dt} &= 2\cdot\omega\cdot P_2(t)-(\omega+\mu)\cdot P_1(t)+\mu\cdot P_0(t);\\ \frac{dP_0(t)}{dt} &= \omega\cdot P_1(t)-\mu\cdot P_0(t). \end{aligned}\right\}$$

Решение системы уравнений при начальных условиях $P_2(0) = 1$ и $P_1(0) = P_0(0) = 0$, с учетом того, что $P_0(t) + P_1(t) + P_2(t) = 1$ имеет вид:

$$P_0(t)=\frac{2\cdot\omega^2}{(\omega+\mu)^2+\omega^2}\times$$

$$\times\left(\frac{1+S_2\cdot\exp S_1\cdot t-S_1\cdot\exp S_2\cdot t}{\sqrt{\omega^2+4\cdot\omega\cdot\mu}}\right),$$

где

$$S_{1,2}=-0,5\cdot\left(3\cdot\omega+2\cdot\mu\pm\sqrt{\omega^2+4\cdot\omega\cdot\mu}\right).$$

При резервировании замещением резервный элемент может отказать только после того, как его включили вместо основного. В этом случае граф переходов принимает следующий вид:

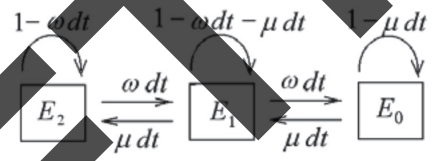

Рис. 2. Модель надежности дублированной системы при резервировании замещением и ограниченном восстановлении

Этому графу соответствуют система дифференциальных уравнений:

$$\left.\begin{aligned} \frac{dP_2(t)}{dt} &= -\omega\cdot P_2(t)+\mu\cdot P_1(t);\\ \frac{dP_1(t)}{dt} &= -\omega\cdot P_2(t)-(\omega+\mu)\cdot P_1(t)+\mu\cdot P_0(t);\\ \frac{dP_0(t)}{dt} &= \omega\cdot P_1(t)-\mu\cdot P_0(t). \end{aligned}\right\}$$

Решая систему уравнений при указанных выше начальных условиях, получим:

$$P_0(t)=\frac{\omega^2}{(\omega+\mu)^2+\omega\cdot\mu}\times$$

$$\times\left(\frac{1+S_2\cdot\exp S_1\cdot t-S_1\cdot\exp S_2\cdot t}{2\cdot\sqrt{\omega\cdot\mu}}\right),$$

где $S_{1,2}=-\left(\omega+\pm\sqrt{\omega\cdot\mu}\right)$.

Для определения вероятности безотказной работы для заданного интервала времени выражение преобразуется к виду:

$$P(t)=\exp\left(-\frac{t}{T}\right),$$

где $T=\frac{1+3\cdot\rho}{2\cdot\rho}\cdot T_0$ – для постоянного резервирования ($\rho = \omega/\mu$);

$T=\frac{1+2\cdot\rho}{\rho}\cdot T_0$ – для резервирования замещением.

Для унификации расчета в теории надежности такие объекты заменяются структурной схемой (схемой замещения) по надежности, состоящей из n элементов, функционально связанных между собой, каждый из которых может находиться в двух состояниях – работоспособности или отказа (рис. 3).

В реальных системах электроснабжения число параллельно работающих элементов, как правило, не более двух, поэтому при расчетах надежности можно воспользоваться упрощенными формулами [1–4]:

для вероятности безотказной работы и вероятности отказа системы

$$P_{\text{рез}}(t)=P_1(t)+P_2(t)-P_1(t)\cdot P_2(t);$$

$$Q_{\text{рез}}(t)=\left[1-P_1(t)\right]\cdot\left[1-P_2(t)\right]=$$

$$=1+P_1(t)\cdot P_2(t)-P_1(t)-P_2(t);$$

для интенсивности потока отказов

$$\omega_{\text{рез}}(t)=\omega_1(t)\cdot\omega_2(t)\cdot(T_{\text{в}1}+T_{\text{в}2});$$

для времени восстановления

$$T_{\text{в рез}}=\frac{\omega_1(t)\cdot T_{\text{в}1}+\omega_2(t)\cdot T_{\text{в}2}}{\omega_1(t)+\omega_2(t)}.$$

Для обобщения характеристик надежности электроснабжения нужно использовать единый критерий эффективности. В современных условиях при переходе от директивного управления предприятиями к рыночному таким показателем являются экономические затраты.

RETRACTED

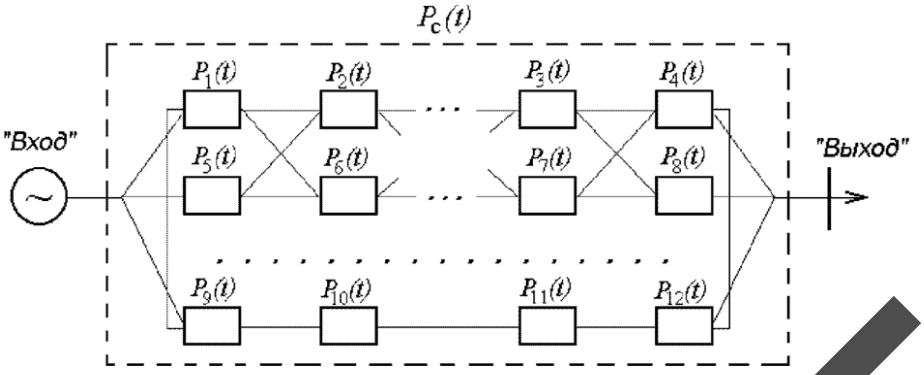

Рис. 3. Структурная схема надежности сложной системы

Если исходить из того, что количество выпускаемой предприятием продукции (и его доход) пропорционально полученной электроэнергии [6–10]:

$$П = k \cdot W = k \cdot N_{ср} \cdot t_{раб},$$

то основная составляющая ущерба будет пропорциональна снижению производительности:

$$У(t) = \Delta П = k \cdot \Delta W = k \cdot N_{ср} \cdot t_{огр},$$

где $N_{ср}$ – средняя потребляемая мощность, кВт; $t_{раб}$ – нормативное время работы потребителя, час; $t_{огр}$ – время нарушения электроснабжения (время ограничения), час.

Таким образом, расчетный экономический ущерб потребителя от перерыва электроснабжения имеет две составляющих:

$$У = У' + У'',$$

где $У'$ – первичный ущерб, вызванный перерывом электроснабжения данного потребителя (предприятия или технологического агрегата), руб.; $У''$ – вторичный ущерб в результате вынужденного простоя следующей технологической ступени или смежного предприятия, руб.

Если известна величина удельного ущерба y_t, руб./ед. прод.:

$$У' = y_t \cdot T_{в\,расч} \cdot \omega_{расч} \cdot П = y_t \cdot k_п \cdot П,$$

где $У'$ – первичный ущерб, вызванный перерывом электроснабжения данного потребителя (предприятия или технологического агрегата), руб.; $У''$ – вторичный ущерб в результате вынужденного простоя следующей технологической ступени или смежного предприятия, руб.

Если известна величина удельного ущерба y_t, руб./ед. прод.:

$$У' = y_t \cdot T_{в\,расч} \cdot \omega_{расч} \cdot П = y_t \cdot k_п \cdot П,$$

где $\omega_{расч}$ – расчетная интенсивность аварийных перерывов электроснабжения (параметр потока отказов системы), год$^{-1}$; $T_{в\,расч}$ – расчетное время ликвидации аварии, час; $П$ – средняя производительность предприятия, ед. прод./час; $k_п$ – коэффициент простоя ($k_п = \omega_{расч} \cdot T_{в\,расч}$).

Если известна величина удельного ущерба y_t/W, руб./кВт·ч:

$$У' = \left(y_{t/W} \cdot T_{в\,расч} \cdot \omega_{расч}\right) \cdot N_{ср} =$$

$$= \left(y_{t/W} \cdot T_{в\,расч} \cdot \omega_{расч}\right) \cdot \frac{W_{расч} - W_{факт}}{8760},$$

где $N_{ср}$ – средняя электрическая нагрузка предприятия в нормальном режиме, кВт; $W_{расч}$ – расчетное электропотребление предприятия в нормальном режиме, кВт·ч/год; $W_{факт}$ – фактическое электропотребление предприятия при нарушении электроснабжения, кВт·ч/год.

Аналогично определяется вторичный ущерб:

$$У'' = \left(y_t'' \cdot \Delta T_в \cdot \omega_{расч}\right) \cdot П'',$$

где y_t'' – удельный ущерб, связанный с длительностью простоя вторичного производства, руб./ед. продукции; y''_t/W – удельный ущерб, связанный с простоем (недопотреблением электроэнергии) вторичного производства, руб./кВт·ч; $\Delta T_в$ – простой вторичного производства ($\Delta T_в = T_в - T''_{кр}$),час; $T''_{кр}$ – максимально допустимое (критическое) время перерыва первичного производства без ущерба для вторичного, час.

Если рассматривать в качестве эквивалента расход электроэнергии, то ущерб внезапности можно записать в виде

$$У_0 = \frac{W_{р\,цикл} + W_{восст} - W_{рез}}{w_{уд}},$$

где $W_{р\,цикл}$ – непроизводительный расход энергии на незавершенный технологический цикл, кВт·ч; $W_{восст}$ – затраты энергии на восстановление нормального технологического процесса, кВт·ч; $W_{рез}$ – имеющиеся

RETRACTED

резервы мощности ($W_{рез} = N_{рез} \cdot t_{рез}$), кВт·ч; $w_{уд}$ – удельный расход энергии в нормальном режиме, кВт·ч/ед. прод.

В практических расчетах надежности удобно пользоваться удельными величинами ущерба, отнесенного либо к мощности технологической брони, либо к полной установленной мощности рассматриваемого потребителя, от которых легко перейти к удельному ущербу на единицу продукции:

$$y_0 = \frac{У_0}{N_{тех\ бр}} \cdot w_{тех\ бр};\ y_0 = \frac{У_0}{N_{уст}} \cdot w_{уд}.$$

В итоге полный экономический ущерб потребителя можно определить по формулам:

$$У' = \gamma \cdot \left(y_0 + y_t \cdot T_{в\ расч}\right) \cdot \omega_{расч} \cdot П;$$

$$У' = \gamma \cdot \left(y_0 + y_{t/W} \cdot T_{в\ расч}\right) \cdot \frac{W_{расч} - W_{факт}}{8760} \cdot \omega_{расч},$$

где y_0 – составляющая удельного ущерба, связанная с фактом потери питания, руб./(перерыв × ед. прод.); γ – коэффициент, учитывающий степень ограничения производства при перерывах электроснабжения.

Выводы

1. При проектировании и эксплуатации систем электроснабжения одним из важнейших критериев является экономичность, то есть снижение издержек на эксплуатацию системы. Оптимальность проектного решения при этом означает, что заданный производственный эффект получается при минимально возможных затратах материальных ресурсов.

2. Окончательный вариант проектного решения определяется путем комплексного технико-экономического сравнения (по критериям надежности и экономичности). При этом практически неразличимыми считают варианты, у которых значения $p_н \cdot K$ + И различаются менее чем на 5 %, а значения У – менее чем на 10 %. Уверенное различение вариантов по затратам с учетом ущерба начинается при различии оценок затрат не менее чем на 15 %. При различии оценок затрат с учетом ущерба на 5–15 % вероятность ошибки при выборе составляет 10–20 %, т.е. весьма существенна.

3. В действительности, величина У – случайная и позволяет прямо использовать критерии оптимизации. В математической статистике для ухода от подобной неопределенности случайную величину заменяют ее средним значением, но при этом остается риск, что фактический ущерб окажется больше среднего, и это превышение характеризуется величиной среднеквадратического отклонения.

4. Если субъект экономики (энергоснабжающее предприятие) делает какие-то затраты на обеспечение надежности, то он должен быть уверен в их оправданности с учетом ожидаемого риска.

5. В случае, если все экономические решения принимаются государством или от имени государства (пример – РАО «ЕЭС»), то величина $\overline{\Sigma З}$ очень велика по сравнению с затратами по какому-то конкретному объекту, и цена риска приближается к нулю. На этом основании во всех расчетах вполне допустимо пользоваться средними значениями ущерба.

6. Однако в современной многоукладной экономике много хозяйствующих субъектов, распоряжающихся гораздо меньшими ресурсами, для которых важно учитывать экономические риски и использовать различные страховые механизмы.

Список литературы

1. Баширов М.Г., Хисматуллин А.С., Хуснутдинова И.Г. Применение барботажа в системе охлаждения силовых трансформаторов / Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2014. – № 3. – С. 29–33.

2. Баширов М.Г., Хисматуллин А.С., Салиева Л.М., Зайнакова И.Ф. Совершенствование хроматографического метода оценки технического состояния силовых масляных трансформаторов / Фундаментальные исследования. – 2015. – № 10 (часть 2). – С. 233–237.

3. Баширов М.Г., Хисматуллин А.С., Камалов А.Р. Исследование изменения теплопроводности масла при барботаже в системе охлаждения силовых трансформаторов // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6. – С. 338.

4. Муллакаев М.С. Ультразвуковая интенсификация технологических процессов добычи и переработки нефти, очистки нефтезагрязненных вод и грунтов. Дис. докт. техн. наук. Московский государственный университет инженерной экологии. – М.: 2011. – 391 с.

5. Хисматуллин А.С., Филиппов А.И. Исследование явлений переноса в жидкости с газовыми пузырьками при акустическом воздействии // Обозрение прикладной и промышленной математики. – Т. 15. Выпуск № 1. – М., 2008. – С. 179–180.

6. Хисматуллин А.С., Гареев И.М. Исследование переноса интегрального параметра в жидкости с газовыми пузырьками // Экологические системы и приборы. – 2015. – № 7. – С. 38–42.

7. Хисматуллин А.С. Расчет теплового поля в силовых масляных трансформаторах с элегазовым охлаждением / Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2015. – № 2. – С. 23–30.

8. Хисматуллин А.С. Теоретическое и экспериментальное исследование теплопереноса в жидкости с газовыми пузырьками: дис. на соискание уч. ст. канд. физ.-мат. наук. – Уфа, 2010. – С. 14–16.

9. Хисматуллин А.С., Минлибаев М.Р., Аллагулов А.И. Контроль и управление технологическими параметрами системы охлаждения масляного трансформатора / Повышение надежности и энергоэффективности электротехнических систем и комплексов: межвузовский сборник научных трудов // редкол.: В.А. Шабанов и др.– Уфа: Изд-во УГНТУ, 2014. – С. 121–123.

10. Bashirov M.G., Minlibayev M.R., Hismatullin A.S. Increase of efficiency of cooling of the power oil transformers. Oil and Gas Business: electronic scientific journal. – 2014. – Issue 2. – P. 358–367.

RETRACTED