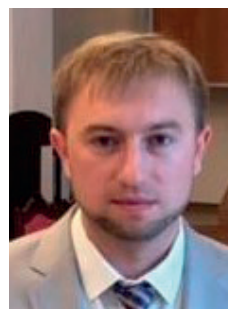




Герасименко А. А.
Gerasimenko A. A.

*доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры
«Электрические станции
и электроэнергетические системы»,
ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный
университет»,
г. Красноярск, Российская Федерация*



Пузырев Е. В.
Puzyrev E. V.

*кандидат технических наук,
инженер II категории службы релейной
защиты,
автоматики и метрологии
Саяно-Шушенской ГЭС,
г. Саяногорск, Российская Федерация*

УДК 621.311.001.57

DOI: 10.17122/1999-5458-2019-15-4-68-73

ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ДЕТЕРМИНИРОВАННОЙ И СТАТИСТИЧЕСКОЙ МЕТОДИКИ РАСЧЁТА ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И УЧЁТА МНОЖЕСТВА РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

Надежность является важной составляющей качества программного обеспечения. Между тем, специфическим свойством программного обеспечения является тот факт, что его надежность возрастает с течением времени вследствие обнаружения и устранения содержащихся в нем ошибок («багов»). Этот процесс описывается математическими моделями роста надежности.

В статье анализируются разнообразные модели роста надежности применительно к совершенному и несовершенному дебаггингу. Традиционный подход к использованию таких моделей требует задания всех функций в аналитической форме, что затруднительно ввиду наличия неопределенности.

Показывается возможность преодоления отмеченной трудности за счет применения математического аппарата, основанного на теории интервальнозначных вероятностей и привлечения экспертных суждений. Это позволяет сделать модель более адекватной реальным условиям.

Ключевые слова: программное обеспечение, модель роста надежности, интервальнозначные вероятности.

SOFTWARE IMPLEMENTATION OF DETERMINISTIC AND STATISTICAL METHODS FOR CALCULATING POWER LOSSES AND ACCOUNTING FOR MULTIPLE MODES OF ELECTRIC NETWORK

Reliability is an important component of software quality. Meanwhile, a specific property of the software is the fact that its reliability increases over time due to the detection and elimination of errors («bugs») contained in it. This process is described by mathematical models of reliability growth.

The paper analyzes various reliability growth models in relation to perfect and imperfect debugging. The traditional approach to using such models requires specifying all the functions in an analytical form, which is difficult due to the presence of uncertainty.

There is shown the possibility of overcoming the noted obstacles through the application of a mathematical technique based on the theory of interval-valued probabilities and the use of expert judgments. This allows us to make the model more adequate to the real conditions.

Key words: software, reliability growth model, interval-valued probabilities.

Введение

Правильный учёт и анализ, а также снижение потерь электрической энергии всегда были и остаются одними из приоритетных задач для сетевых предприятий и организаций всех уровней и, в первую очередь, систем распределения электрической энергии, поскольку потери электроэнергии (ЭЭ) являются центральным показателем оценки энергоэффективности их функционирования [1–3]. Наряду с этим, планирование и анализ режимов работы электрических сетей (ЭС), в частности, разработка мероприятий снижения потерь ЭЭ и оценка их эффективности, обоснование и установление региональных тарифов на ЭЭ и решение ряда других задач, требует развития и совершенствования различных методов и алгоритмов расчёта потерь ЭЭ. Данный центральный интегральный показатель режимов с высокой надёжностью (с высокой точностью и требуемой достоверностью) определяется полным учётом всего множества электрических режимов работы (многорежимности), связанного с изменением нагрузок, составом и конфигурацией ЭС. Учёт изменения схемы ЭС в ремонтных режимах и влияние на оценку потерь ЭЭ за отчётный месячный интервал времени рассмотрены в [4]. В данном случае представлена программная реализация методов расчёта потерь ЭЭ и соответствующего учёта множества электрических режимов, вызванная изменением нагрузок ЭС.

Наибольшее распространение получили детерминированные методы расчёта потерь ЭЭ [5, 6], в меньшей мере — стохастические и комбинированные подходы к расчёту потерь [7, 8].

Краткое описание подходов и основных расчётных выражений по определению потерь электроэнергии

Проблемное содержание данной задачи состоит в необходимости суммирования (точного или приближённого) всего множества или представительного характерного

множества потерь активной мощности на заданном временном интервале (сутки, месяц, квартал). Для ЭС, содержащей m ветвей и $n+1$ узлов, с $d = T / \Delta t$ интервалами усреднения графиков нагрузок и длительностью усреднения Δt на временном интервале T потери ЭЭ описываются следующими принципиальными выражениями [5]:

$$\Delta W_{\Sigma}^n = 3 \sum_{j=1}^m R_j \int_0^T I_j^2(t) dt = \sum_{j=1}^m \int_0^T \Delta P_j(t) dt = \sum_{i,j}^{n+1} \int_0^T \Delta P_{ij}(t) dt \approx \sum_{i,j}^{n+1} \sum_s^d \Delta P_{ijs} \Delta t_s, \quad (1)$$

где ΔP_{ij} — потери мощности на участке i - j электросети для интервала усреднения s .

Реализация (1), выполняемая на основе серии расчётов установившихся режимов и дающая наиболее точные значения потерь ЭЭ, чрезмерно трудоёмка, в том числе из-за большого объёма и также случайного и частично неопределённого характера части исходной информации, особенно для сетей 6–35 кВ. В программном комплексе POTER1, объединяющем под общее управление ряд программно-расчётных модулей, алгоритмы базируются в основном на одном расчёте установившегося режима для средних нагрузок. При этом реализованы три следующих направления учёта совокупности режимов и соответственно расчёта потерь ЭЭ.

1. Детерминированный классический метод среднеквадратичного тока с восстановлением среднеквадратичных токов на основе средних (псевдосредних) значений нагрузок I_{cp} и коэффициента формы k_{ϕ} , учитывающего множество режимов по данным узлового потребления ЭЭ и отпуска ЭЭ в сеть. Метод реализуется в следующем виде [6]:

$$\Delta W_{det} = 3k_{\phi}^2 \sum_{j=1}^m I_{cpj}^2 R_j T = \left[\sum_{j=1}^m \Delta P_{cpj} + (k_{\phi}^2 - 1) \Delta P_{cp} \right] T = M \Delta W + \sigma \Delta W, \quad (2)$$

где $M \Delta W$, $\sigma \Delta W$ — основная и дисперсионная составляющие потерь ЭЭ.

2. Стохастический метод, базирующийся на факторной модели электрических нагрузок и модифицированной стохастической модели анализа многорежимности, представлен выражением [7]:

$$\Delta W_{\text{в.с.}} \approx \left[\Delta P(MU, M\delta) + \left(\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n k(U_i U_j) \frac{\partial^2 \Delta P}{\partial U_i \partial U_j} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n k(U_i \delta_j) \frac{\partial^2 \Delta P}{\partial U_i \partial \delta_j} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n k(\delta_i \delta_j) \frac{\partial^2 \Delta P}{\partial \delta_i \partial \delta_j} \right) \right] \cdot T =$$

$$= [\Delta P(MU, M\delta) + \sigma(\Delta P)] \cdot T = M\Delta W + \sigma\Delta W, \quad (3)$$

где $\Delta P(MU, M\delta)$, $\sigma(\Delta P)$ — основная и дисперсионная составляющие потерь мощности;

$k(\delta_i \delta_j)$, $k(\delta_i U_i)$, $k(U_i U_j)$ — корреляционные моменты модулей и фаз напряжений, вычисленные для режима средних нагрузок на основе факторной модели нагрузок;

$\frac{\partial^2 \Delta P}{\partial U_i \partial U_j}$, $\frac{\partial^2 \Delta P}{\partial U_i \partial \delta_j}$, $\frac{\partial^2 \Delta P}{\partial \delta_i \partial \delta_j}$ — вторые производные выражения потерь мощности по соответствующим параметрам, определяемые для данного режима.

3. Комбинированный метод заключается в определении средневзвешенной величины потерь, найденной по результатам расчёта их составляющих $\Delta W_{\text{дет}}$, $\Delta W_{\text{в.с.}}$ детерминированным и стохастическим алгоритмами [9]:

$$\Delta W_{\text{расч}} = \Delta W_{\text{дет}} \cdot \alpha + \Delta W_{\text{в.с.}} \cdot \beta, \quad (4)$$

где α, β — оптимальные весовые коэффициенты, связанные условием $\alpha + \beta = 1$, найденные по критерию минимума ошибки формирования величины потерь детерминированным и стохастическим методами соответственно.

Краткое описание функционирования комплекса POTERI

Работа над программным комплексом POTERI началась со сборки и отладки хорошо зарекомендовавших себя в инженерных вычислениях программ REG10PVT и SETI. Данные программы были написаны на базе языка программирования FORTRAN, который на сегодняшний день является не востребовавшимся, на его смену пришли современные языки программирования, такие как: C, C++, Delphi и другие. В связи этим перед авторами встала задача актуализации

данных программных разработок. Поэтапное изучение работы отдельных программ и проработка алгоритмов, их доработка и усовершенствование способствовали созданию нового единого программного комплекса POTERI, который на сегодняшний день имеет несколько версий [10]. Каждая из версий комплекса отличается различным набором функциональных возможностей программных модулей. Последняя версия комплекса базируется на взаимодействии четырёх программных модулей: SETI, REG10PVT, VES, RES (рисунок 1).



Рисунок 1. Укрупнённая модульная структура программного комплекса POTERI

В совокупности комплекс POTERI имеет широкие функциональные возможности, поскольку реализует различные методы по расчёту потерь ЭЭ: детерминированный, стохастический и комбинированный.

Далее кратко представлены возможности сформированного программного комплекса POTERI. Подробное описание по работе пользователя с комплексом и его функционированию изложено в инструктивных указаниях к каждому из программных модулей.

В зависимости от имеющейся исходной информации и цели расчёта реализуется соответствующий расчётный модуль-метод. Для этого необходимо заранее подготовить исходный файл, который для каждого из модулей имеет свои особенности построения и ввода параметров схемы замещения.

Расчёт потерь электроэнергии детерминированным способом (вход «Детерминированный метод») организуется с помощью основного диалогового окна программного модуля REG10PVT, выполняющего также расчёт параметров установившегося режима

сети по нагрузкам, заданным значениями активной и реактивной мощностей (P и Q) — вход (кнопка) «НАГРУЗКИ P и Q » или тока и коэффициента мощности (I и $\cos\varphi$) — вход (кнопка) «НАГРУЗКИ I и $\cos(\varphi_i)$ ».

В программном модуле возможно выполнение расчёта потерь электроэнергии как для отдельного участка сети (вход «РАСЧЁТ ПОТЕРЬ ЭЭ ПО ОТПУСКУ»), так и в целом по всей сети напряжением 6–35 кВ для неограниченного количества фрагментов, составляющих в совокупности рассматриваемую сеть (вход «РАСЧЁТ ПОТЕРЬ ЭЭ ПО ВСЕЙ СЕТИ») — программный модуль RES [10], структурно интегрированный в программный модуль REG10PVT.

Программный модуль SETI предназначен для расчётов установившихся режимов и интегральных характеристик множества режимов при задании нагрузок средними или наибольшими значениями мощностей. Стохастические алгоритмы данного модуля построены на основе факторной модели матрицы корреляционных моментов, выполненными методом главных компонент с получением моделирующих обобщённых (ортогональных) графиков нагрузок (ОГН). Метод эффективен, поскольку с помощью небольшого количества таких графиков (до 3–4 ОГН) интегральные характеристики множества режимов (потери ЭЭ, диапазоны и диаграммы (графики) изменения напряжений в узлах сети и реактивной мощности источников) определяются в результате одного расчёта установившегося режимов для средних нагрузок и трёх-четырёх решений систем линейных уравнений с неизменной матрицей Якоби уравнений данного режима [9]. Основу алгоритмов модуля составляют метод Ньютона и вероятностно-статистическая факторная модель электрических нагрузок. Следует отметить, что расчёт интегральных характеристик возможен при вводе суточных графиков активных и реактивных мощностей $P(t)$, $Q(t)$ в узлах в явном виде или после считывания отраслевых (типовых) графиков из базы данных и обобщённых факторных моделей — ортогональных графиков нагрузки $\Gamma(t)$. При расчёте потерь ЭЭ стохастическим методом (модуль SETI) предусмотрена возможность обновления отдельных ОГН, вновь

полученных после статистической обработки отраслевых графиков различных распределительных систем, что существенно расширяет возможности программного модуля в направлении повышения точности результатов расчёта потерь ЭЭ.

Комбинированный подход практически реализован на основе сочетаний программных модулей REG10PVT и SETI, реализующих соответственно уточнённый детерминированный и стохастический методы. Оптимальное сочетание результатов по данным методам установлено с помощью статистических испытаний и находится в интервале $\beta=[0,7; 0,8]$. Выбор соответствующего весового сочетания результатов по детерминированному и вероятностно-статистическому методам выполняется по данным протоколов расчётов в программном модуле VES. На базе комбинированного подхода в данном модуле программно реализован усовершенствованный алгоритм расчёта и оценки норматива потерь ЭЭ [9, 11, 12].

Программный комплекс POTERI имеет государственную регистрацию в реестре программ для ЭВМ, проходит апробацию в сетевых организациях, используется для решения ряда задач эксплуатации и функционирования электрических сетей, применяется в учебных и научных целях.

Примеры расчётов с помощью представленных отдельных программ REG10PVT и SETI и программного комплекса POTERI приведены в [6, 7].

Выводы

1. Разработан многофункциональный программно-вычислительный комплекс «POTERI» для расчёта, анализа и нормирования потерь электроэнергии, совместимый с различными операционными системами. Разработка выполнена на основе ранее разработанных программных модулей, апробированных в электросетевых предприятиях, в научной и учебной работе.

2. Сформирована математическая, алгоритмическая и программная база для создания программно-вычислительного аппарата расчёта интегральных характеристик множества режимов систем распределения электрической энергии высокой надёжности отраслевого уровня.

Список литературы

1. Воротницкий В.Э., Кутовой Г.П., Овсейчук В.А. Снижение потерь электроэнергии. Стратегический путь повышения энергетической эффективности сетей // Новости электротехники. 2015. № 4 (94). 22 с.
2. Седельников А.В., Павлюченко Д.А. Компенсация реактивной мощности в распределительных электрических сетях 10/0,4 кВ // Главный энергетик. 2015. № 11–12. С. 25–29.
3. Воротницкий В.Э., Жежеленко И.В., Трофимов Г.Г. Повышение энергетической эффективности сетей // Региональная энергетика и энергосбережение. 2017. № 4. С. 50–52.
4. Герасименко А.А., Пузырев Е.В. Оценка влияния длительности ремонтного состояния электрической сети на рост потерь электрической энергии // Электрические станции. 2017. № 3. С. 21–30.
5. Железко Ю.С., Артемьев А.В., Савченко О.В. Расчёт, анализ, нормирование потерь электроэнергии в электрических сетях. М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2004. 290 с.
6. Герасименко А.А., Тимофеев Г.С. Методика, алгоритм и программа расчёта технических потерь электроэнергии в распределительных сетях энергосистем // Вестник электроэнергетики. 2001. № 4. 74 с.
7. Герасименко А.А., Шульгин И.В. Стохастический метод расчёта нагрузочных потерь электроэнергии в распределительных электрических сетях // Электрические станции. 2013. № 4. С. 44–59.
8. Манусов В.З., Болоев Е.В., Войтов О.Н., Голуб И.И. Вероятностный анализ переменных режима электроэнергетической системы // Электричество. 2014. № 1. С. 12–20.
9. Герасименко А.А., Пузырев Е.В. The Combined Presentation of Deterministic and Stochastic Approaches in the Algorithm of Calculation of Energy Losses in Electric Networks // Журнал СФУ. Техника и технологии. 2017. № 10 (1). С. 6–16.
10. Герасименко А.А., Пузырев Е.В. Software Implementation of Deterministic and Stochastic Calculation Methods of Electric Energy Losses in Electrical Distribution Networks // Znanstvena misel journal. 2018. T. 1. No. 14. P. 49–57.
11. Герасименко А.А., Пузырев Е.В. Программный модуль «RES» программного комплекса «POTERI» расчёта потерь элек-

троэнергии в распределительных сетях // Технические науки: проблемы и решения: сб. ст. по матер. XIX междунар. науч.-практ. конф. 2019. № 1 (17). С. 108–114.

12. Герасименко А.А., Пузырев Е.В. Программный модуль «VES» комбинированного расчёта потерь электрической энергии программы «POTERI V1.1: SETI, REG-10PVT» // Проблемы и перспективы развития электроэнергетики и электротехники: сб. ст. Всерос. науч.-практ. конф. Казань, 2019. С. 3–8.

References

1. Vorotnitskii V.E., Kutovoi G.P., Ovseichuk V.A. Snizhenie poter' elektroenergii. Strategicheskii put' povysheniya energeticheskoi effektivnosti setei [Reduction of Power Losses. Strategic Way to Improve the Energy Efficiency of Networks]. *Novosti elektrotekhniki — News of Electrical Engineering*, 2015, No. 4 (94), 22 p. [in Russian].
2. Sedel'nikov A.V., Pavlyuchenko D.A. Kompensatsiya reaktivnoi moshchnosti v raspredelitel'nykh elektricheskikh setyakh 10/0,4 kV [Reactive Power Compensation in 10/0.4 kV Distribution Electric Networks]. *Glavnyi energetik — Chief Power Engineer*, 2015, No. 11-12, pp. 25–29. [in Russian].
3. Vorotnitskii V.E., Zhezhelenko I.V., Trofimov G.G. Povyshenie energeticheskoi effektivnosti setei [Improving the Energy Efficiency of Networks.]. *Regional'naya energetika i energosberezhenie — Regional Energy and Energy Saving*, 2017, No. 4, pp. 50–52. [in Russian].
4. Gerasimenko A.A., Puzyrev E.V. Otsenka vliyaniya dlitel'nosti remontnogo sostoyaniya elektricheskoi seti na rost poter' elektricheskoi energii [Assessment of the Influence of the Duration of the Repair State of the Electric Network on the Growth of Losses of Electric Energy]. *Elektricheskie stantsii — Electric Stations*, 2017, No. 3, pp. 21–30. [in Russian].
5. Zhelezko Yu.S., Artem'ev A.V., Savchenko O.V. Raschet, analiz, normirovanie poter' elektroenergii v elektricheskikh setyakh [Calculation, Analysis, Regulation of Electricity Losses in Electric Networks]. Moscow, NTs ENAS Publ., 2004. 290 p. [in Russian].

6. Gerasimenko A.A., Timofeev G.S. Metodika, algoritm i programma rascheta tekhnicheskikh poter' elektroenergii v raspredelitel'nykh setyakh energosistem [Methods, Algorithm and Software for Calculation of Technical Losses of Electricity in Distribution Networks Power Systems]. *Vestnik elektroenergetiki — Bulletin of the Electric Power Industry*, 2001, No. 4, 74 p. [in Russian].
7. Gerasimenko A.A., Shul'gin I.V. Stokhasticheskii metod rascheta nagruzochnykh poter' elektroenergii v raspredelitel'nykh elektricheskikh setyakh [Stochastic Method of Calculating the Load Losses of Electricity in Distribution Networks]. *Elektricheskie stantsii — Electric Stations*, 2013, No. 4, pp. 44–59. [in Russian].
8. Manusov V.Z., Boleov E.V., Voitov O.N., Golub I.I. Veroyatnostnyi analiz peremennykh rezhima elektroenergeticheskoi sistemy [Probabilistic Analysis of the Transferred Modes of the Electric Power System]. *Elektrichestvo — Electricity*, 2014, No. 1, pp. 12–20. [in Russian].
9. Gerasimenko A.A., Puzyrev E.V. The Combined Presentation of Deterministic and Stochastic Approaches in the Algorithm of Calculation of Energy Losses in Electric Networks. *Zhurnal SFU. Tekhnika i tekhnologii — J. Sib. Fed. Univ. Eng. Technol.*, 2017, No. 10 (1), pp. 6–16.
10. Gerasimenko A.A., Puzyrev E.V. Software Implementation of Deterministic and Stochastic Calculation Methods of Electric Energy Losses in Electrical Distribution Networks. *Znanstvena Misel Journal*, 2018, Vol. 1, No. 14, pp. 49–57.
11. Gerasimenko A.A., Puzyrev E.V. Programmnyi modul' «RES» programmno kompleksa «POTERI» rascheta poter' elektroenergii v raspredelitel'nykh setyakh [Software Module «RES» Software «POTERI» Calculation of Energy Losses in Distribution Networks]. *Sbornik statei po materialam XIX Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Tekhnicheskie nauki: problemy i resheniya»* [Collection of Articles on Materials of XIX International Scientific-Practical Conference «Technical Sciences: Problems and Solutions». 2019, No. 1 (17), pp. 108–114. [in Russian].
12. Gerasimenko A.A., Puzyrev E.V. Programmnyi modul' «VES» kombinirovannogo rascheta poter' elektricheskoi energii programmy «POTERI V1.1: SETI, REG10PVT» [Program Module «VES» of Combined Calculation of Losses of Electric Energy of the Program «POTERI V1.1: SETI, REG10PVT»]. *Sbornik statei Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Problemy i perspektivy razvitiya elektroenergetiki i elektrotekhniki»* [Collection of Articles of the All-Russian Scientific and Practical Conference «Problems and Prospects of Development of Electric Power Industry and Electrical Engineering»]. Kazan', 2019, pp. 3–8. [in Russian].