



## ПРОЕКТЫ И ИССЛЕДОВАНИЯ

### Методы оценки надежности и независимости источников питания в системах промышленного электроснабжения

Ершов М. С., Егоров А. В., доктора техн. наук,  
Анцифоров В. А., магистр техники и технологии

Российский государственный университет нефти и газа имени И. М. Губкина, Москва

Рассмотрены методы оценки надежности и независимости источников питания систем централизованного электроснабжения. Предложены методики, которые могут быть полезны при разработке мероприятий по повышению надежности и устойчивости работы промышленных электротехнических систем непрерывных производств, чувствительных к кратковременным нарушениям электроснабжения.

**Ключевые слова:** системы электроснабжения, надежность и независимость источников питания.

В настоящее время частой причиной массовых отключений электрооборудования, приводящих к остановам непрерывных производств, являются кратковременные нарушения электроснабжения [1, 2] (проявляющиеся в виде провалов напряжения в узлах нагрузки и на вводах электроприемников) вследствие аварий (КЗ) в сетях внутреннего и особенно в протяженных сетях внешнего электроснабжения. В результате происходят самопроизвольные отключения электродвигателей напряжением до 1 кВ из-за отпадания магнитных пускателей и контакторов (за время от одного до нескольких периодов напряжения [3]) и нарушение устойчивости промышленных электротехнических систем (ЭТС) с большой электродвигательной нагрузкой (за время порядка нескольких десятых долей секунды [2]).

Проблема, связанная с кратковременными нарушениями электроснабжения, становится все более острой по мере усложнения технологических процессов и использования цифровых средств автоматизации. Она осложняется тем, что относительно кратковременных нарушений электроснабжения независимых источников питания не бывает в принципе [1]. Взаимозависимость источников при централизованном электроснабжении обусловлена замкнутой структурой внешних сетей, но даже и при разомкнутой их структуре параллельно работающие источники зависят друг от друга.

Выбор и обоснование применения тех или иных противоаварийных мероприятий,

направленных на повышение надежности и устойчивости работы промышленных ЭТС непрерывных производств, должны проводиться с учетом реальной количественной оценки надежности и независимости источников питания на стадии эксплуатации или проектирования системы электроснабжения. Общие подходы к оценке независимости источников питания рассмотрены в [1, 4 – 6]. В данной статье указанные подходы представлены в виде рекомендаций для практического применения.

Предлагаемый минимальный набор параметров надежности и независимости  $j$ -го источника питания ЭТС должен включать:

среднюю частоту критических провалов напряжения в рассматриваемом узле ЭТС за год  $N_{(j)}$ , год<sup>-1</sup>;

среднюю глубину критических провалов напряжения  $\Delta u_{(j)}$ , отн. ед.;

среднюю длительность провалов напряжения  $\tau_{(j)}$ , с;

коэффициент зависимости  $i$ -го и  $j$ -го источников питания  $k_{3(i,j)}$ .

На стадии эксплуатации оценка параметров осуществляется на основе анализа осциллограмм напряжения, фиксируемых с помощью устройств цифровой регистрации сигналов, например, измерителя-регистратора показателей качества электроэнергии “Ресурс UF2С(М)”, регистратора аварийных сигналов “Бреслер-0105”, анализатора качества электроэнергии АРАНАР-М12092, цифрового регистратора электрических процессов “ПАРМА

РП4.06". Перспективна концепция сплошного мониторинга напряжения (*Full Disclosure Monitoring*) [7], основанная на сплошной непрерывной фиксации всех заданных параметров с хранением полученного информационного массива.

Указанные параметры рассчитывают по следующим формулам:

средняя частота критических провалов напряжения за год

$$N_{(j)} = \Sigma N_{(j)i} / \Sigma T, \quad (1)$$

где  $N_{(j)i}$  — число провалов напряжения, попадающих в зону сильных возмущений, на  $j$ -м источнике за период наблюдения  $T$ .

При несимметричных провалах напряжения остаточное напряжение рекомендуется определять по составляющей напряжения прямой последовательности [8]. Сильными следует считать провалы напряжения, определяемые уставкой защиты минимального напряжения узла, например, провалы ниже 0,7 отн. ед.;

средняя глубина провалов напряжения, отн. ед.,

$$\Delta u_{(j)} = \Sigma \Delta u_{(j)k} / n_{(j)}, \quad (2)$$

где  $\Delta u_{(j)k}$  — глубина провала напряжения в  $k$ -м случае;  $n_{(j)}$  — общее число провалов напряжения в узле ниже установленного значения за период наблюдения  $T$ ;

средняя длительность провалов напряжения, с,

$$\tau_{(j)} = \Sigma \tau_{(j)k} / n_{(j)}, \quad (3)$$

где  $\tau_{(j)k}$  — длительность провала напряжения ниже уровня статической устойчивости в  $k$ -м случае;

коэффициент зависимости  $i$ -го и  $j$ -го источников питания ЭТС, определяемый как оценка вероятности одновременных критических провалов напряжения,

$$k_{з(i,j)} = N_{(i,j)} / (N_{(i)} + N_{(j)} - N_{(i,j)}), \quad (4)$$

где  $N_{(i)}$  и  $N_{(j)}$  — число критических провалов напряжения на  $i$ -м и  $j$ -м источниках;  $N_{(i,j)}$  — число одновременных критических провалов напряжения на обоих источниках за период наблюдения  $T$ .

Значение коэффициента зависимости источников находится в диапазоне от 0 до 1: чем больше значение коэффициента, тем выше степень зависимости источников.

**На стадии проектирования** параметры надежности и независимости источников пита-

ния могут быть определены по результатам расчета режимов КЗ в системе электроснабжения. При этом рекомендуется применять программное обеспечение для расчета установившихся режимов электрических сетей, например, ENERGY-CS. Возможно использование двух методик.

**Первая методика** [1] основана на минимуме расчетов, поэтому может быть названа экспресс-методикой. В данном случае коэффициент зависимости определяется как отношение глубин снижения напряжения на неповрежденном источнике питания и на том источнике, на котором имеет место КЗ. В качестве точек КЗ целесообразно выбирать основные узлы ЭТС — шины РУ 10(6) кВ ГПП предприятия.

Значение коэффициента зависимости можно определить по формуле

$$k_{zij} = du_i / du_j, \quad (5)$$

где  $du_i = (U_{i\text{норм}} - U_{i\text{КЗ}}) / U_{i\text{норм}}$  — глубина провала напряжения, отн. ед., на  $i$ -м источнике при КЗ на  $j$ -м источнике;  $du_j = (U_{j\text{норм}} - U_{j\text{КЗ}}) / U_{j\text{норм}}$  — глубина провала напряжения, отн. ед., на  $j$ -м источнике при КЗ на  $i$ -м источнике;  $U_{i\text{норм}}$  и  $U_{j\text{норм}}$  — нормальные напряжения на  $i$ -м и  $j$ -м источниках;  $U_{i\text{КЗ}}$  и  $U_{j\text{КЗ}}$  — напряжения на  $i$ -м и  $j$ -м источниках при КЗ на  $j$ -м и  $i$ -м источниках соответственно.

Экспресс-методика отличается простотой и требует расчета минимального числа (равного числу источников питания) аварийных режимов. Вместе с тем ей присущи некоторые недостатки:

в общем случае результаты расчета зависят от нумерации источников, т. е.  $k_{zij} \neq k_{zji}$ ;

из рекомендуемого набора параметров надежности и независимости определяется только один — коэффициент зависимости;

не учитывается устойчивость ЭТС предприятия к возмущениям;

в некоторых случаях получаются необоснованно завышенные оценки независимости источников питания.

Для устранения первого недостатка в качестве результирующего целесообразно выбирать среднее значение

$$k_{zij} = (k_{zij} + k_{zji}) / 2. \quad (6)$$

Третий недостаток связан с тем, что здесь коэффициент зависимости определяется только взаимным снижением напряжения в узлах и не зависит от глубины снижения напряжения в отдельных узлах.

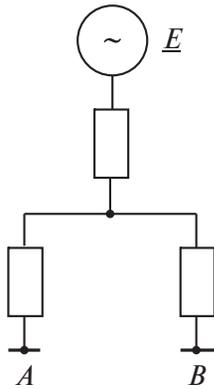


Рис. 1

Последний недостаток можно продемонстрировать с помощью схемы замещения на рис. 1. Здесь существует только один реальный источник питания  $\underline{E}$ , таким образом, имеет место полная взаимозависимость питания основных узлов нагрузки ( $A$  и  $B$ ) предприятия. Однако при мощном источнике питания и значительном электрическом удалении узлов от источника КЗ в любом из узлов мало отражаются на значении остаточного напряжения в другом узле.

Экспресс-методику рекомендуется использовать на стадии эскизного проектирования системы электроснабжения с централизованными источниками питания.

**Вторая методика**, предложенная в [6], позволяет определить все перечисленные выше параметры, поэтому может быть названа **общей методикой**. Она основывается на имитационном моделировании аварий в сетях внешнего электроснабжения, что требует большого объема вычислений. Данная методика модифицирована для упрощения применения ее на практике.

Методика основана на моделировании КЗ во всех узлах системы внешнего электроснабжения, приводящих к глубокому (ниже критического значения) провалу напряжения хотя бы в одном из основных узлов — на шинах РУ 6 (10) кВ ГПП промышленного объекта. В результате моделирования определяются узлы, в которых эти КЗ приводят к глубоким критическим провалам напряжения:

основной узел объекта, питающийся от  $i$ -го источника;

основной узел объекта, питающийся от  $j$ -го источника;

одновременно оба узла.

Здесь в качестве критического напряжения рекомендуется использовать значение

напряжения статической устойчивости ЭТС, определяемого по методике [2].

Поскольку основная масса отказов в системах внешнего электроснабжения связана с отказами воздушных линий электропередачи, частота аварий в узлах может быть определена исходя из параметров потока отказов линий электропередачи, подключенных к  $n$ -му узлу системы внешнего электроснабжения,

$$\omega_n = T \Sigma \omega_{0k} L_k / 2, \quad (7)$$

где  $\omega_{0k}$  — параметр потока отказов  $k$ -й линии электропередачи,  $\text{год}^{-1} \cdot \text{км}$ ;  $L_k$  — длина  $k$ -й линии электропередачи, подключенной к  $n$ -му узлу, км;  $T$  — период наблюдения.

Значения параметра потока отказов линий электропередачи рекомендуется принимать по данным справочника [9].

Число критических провалов напряжения на  $i$ -м,  $j$ -м источниках и на обоих источниках одновременно за период наблюдения  $T$  вычисляется по формулам:

$$\left. \begin{aligned} N_{(i)} &= \Sigma \omega_n, \quad \forall n; \\ N_{(j)} &= \Sigma \omega_m, \quad \forall m; \\ N_{(i,j)} &= \Sigma \omega_l, \quad \forall l, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

где  $\forall n$  — все узлы, КЗ в которых приводят к провалу напряжения на  $i$ -м источнике;  $\forall m$  — все узлы, КЗ в которых приводят к провалу напряжения на  $j$ -м источнике;  $\forall l$  — все узлы, КЗ в которых приводят к провалу напряжения на  $i$ -м и  $j$ -м источниках.

Значение коэффициента зависимости определяют по формуле (4).

Математическое ожидание глубины провалов напряжения со стороны  $i$ -го источника вычисляют из выражения

$$\Delta u_{\text{м.о}(i)} = \Sigma \Delta u_{n(i)} / N_{(i)}, \quad \forall n. \quad (9)$$

Длительность провала напряжения в узлах нагрузки предприятия обусловлена в первую очередь временем срабатывания защит, отключающих поврежденный участок электрической сети. Алгоритм моделирования ограничен имитацией работы двух ступеней защит. При этом на первой ступени для защиты элементов сетей энергосистемы используются быстродействующие защиты с временем срабатывания 0,10 — 0,15 с. При отказе в срабатывании (с заданной вероятностью  $Q$  из диапазона 0,05 — 0,10) основной защиты срабатывает резервная, выдержка времени которой превышает время срабаты-

вания штатных защит на ступень селективности.

Как показано в [10], распределение длительности провалов напряжения подчиняется экспоненциальному закону. Оценка математического ожидания длительности провалов напряжения может быть получена по формуле

$$\tau_{м.о} = \tau_{о.з}(1 - Q) + \tau_{р.з}Q, \quad (10)$$

где  $\tau_{о.з}$  — среднее время отключения КЗ основными защитами;  $\tau_{р.з}$  — среднее время отключения КЗ резервными защитами.

**В качестве примера** ниже представлены некоторые результаты определения показателей надежности и независимости двух источников питания (вводов ГПП) крупного нефтегазового комплекса. Расчеты выполнены по общей методике при разных положениях секционного выключателя СВ 110 кВ на ближайшей районной ПС, к которой подключена линия — один из вводов ГПП. Критический уровень напряжения по обоим вводам принят равным 0,7 отн. ед.

Для случая замкнутого СВ 110 кВ на районной ПС показатели надежности и независимости источников питания трансформатора Т1 (ввод А) и трансформатора Т2 (ввод В) составили:  $N_{(Т1)}$ ,  $N_{(Т2)}$ ,  $N_{(Т1, Т2)}$  — соответственно 30,8; 36,9; 30,8 отключений в год;  $\Delta u_{(Т1)}$ ;  $\Delta u_{(Т2)}$  — 0,37; 0,43 отн. ед.;  $k_{з(Т1, Т2)} = 0,83$ . Для случая разомкнутого СВ 110 кВ те же показатели составили:  $N_{(Т1)}$ ,  $N_{(Т2)}$ ,  $N_{(Т1, Т2)}$  — соответственно 30,5; 31,8; 14,8 отключений в год;  $\Delta u_{(Т1)}$ ,  $\Delta u_{(Т2)}$  — 0,44 и 0,42 отн. ед.;  $k_{з(Т1, Т2)} = 0,19$ . Следует отметить, что в данном случае размыкание секционного выключателя в центре питания привело к уменьшению коэффициента зави-

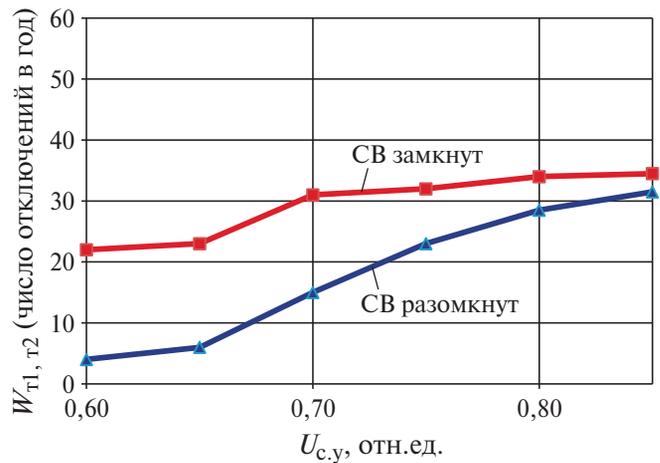


Рис. 2

симости источников более чем в 4 раза. При этом число одновременных критических провалов напряжения по вводам ГПП уменьшилось в 2 раза. Чем лучше статическая устойчивость системы (меньше минимально допустимое напряжение источника, при котором сохраняется устойчивость ЭТС) и больше генерирующие мощности в питающей системе, тем значительно может быть уменьшение числа одновременных критических провалов напряжения при сокращении структурной избыточности в сетях централизованного электроснабжения. Об этом свидетельствуют приведенные на рис. 2 кривые зависимости числа одновременных критических провалов напряжения  $W_{Т1, Т2}$  от значения напряжения статической устойчивости ЭТС  $U_{с.у.}$

В таблице приведены результаты оценки показателей надежности источников питания вводов Т1 и Т2 этого же ГПП, полученные экспериментально (по данным обработки аварийных осциллограмм) и путем компьютерно-

Показатель	Методика оценки		
	Экспериментальная	Экспресс-методика	Общая
Средняя частота отказов по вводу Т1 (число отключений в год)	19	—	30,5
Средняя частота отказов по вводу Т2 (число отключений в год)	12	—	31,8
Средняя частота одновременных отказов по вводам Т1 и Т2 (число отключений в год)	9,8	—	14,8
Средняя глубина провалов напряжения по вводу Т1, отн. ед.	0,37	—	0,44
Средняя глубина провалов напряжения по вводу Т2, отн. ед.	0,27	—	0,42
Коэффициент зависимости вводов	0,24	0,15	0,19

го моделирования для действующей схемы внешнего электроснабжения того же нефтегазового комплекса при разомкнутом секционном выключателе СВ 110 районной ПС.

В данном примере значения коэффициента зависимости источников питания, полученные разными методами, достаточно коррелируются, хотя, как отмечено выше, в некоторых случаях экспресс-методика дает завышенные оценки независимости источников питания. Значения средних частот провалов напряжения, полученные по общей методике, в 1,5 – 2 раза превышают соответствующие показатели, определенные по экспериментальным данным. Это объясняется тем, что компьютерное моделирование КЗ осуществлялось в предположении, что все они трехфазные, в то время как на практике преобладают несимметричные одно- и двухфазные КЗ, обуславливающие меньшую глубину провалов напряжения прямой последовательности.

Полученные характеристики взаимозависимости источников питания можно признать удовлетворительными. Достичь лучших значений коэффициента зависимости в системах централизованного электроснабжения удается редко. Вместе с тем число одновременных критических провалов напряжения остается довольно большим, что можно объяснить дефицитом генерирующих мощностей в данной энергосистеме. В системах с мощными источниками случаев одновременных критических провалов напряжения относительно мощных узлов нагрузки бывает несколько в год.

Результаты оценки и сравнения полученных показателей позволяют сделать следующие выводы:

1) на этапе эксплуатации независимость и надежность источников питания промышленных потребителей можно признать удовлетворительной, если годовые показатели не превышают следующих значений: коэффициента зависимости источников — 0,25; одновременного числа критических провалов напряжения — 5 год<sup>-1</sup>;

2) регулярное нарушение предложенных норм может быть основанием для принятия решения о реконструкции системы электроснабжения за счет строительства собственных электростанций и применения новых технологий в области электроэнергетики.

#### Список литературы

1. Гуревич Ю. Е., Кабиков К. В. Особенности электроснабжения, ориентированного на бесперебойную работу промышленного потребителя. — М.: ЭЛЕКС-КМ, 2005.
2. Ершов М. С., Егоров А. В., Трифонов А. А. Устойчивость промышленных электротехнических систем. — М.: ООО «Издательский дом “Недра”», 2010.
3. Бедрак Я., Бородин Д., Михайлов В. Сети промышленных предприятий. Устройства защиты от провалов напряжения. — Новости ЭлектроТехники, 2012, № 1 (173).
4. Ершов М. С., Егоров А. В., Яценко Д. Е. О влиянии параметров энергосистемы на устойчивость узлов электрической нагрузки промышленных предприятий. — Промышленная энергетика, 1997, № 5.
5. Ершов М. С., Егоров А. В., Яценко Д. Е. Методы определения показателей качества электроснабжения промышленных комплексов. — Электричество, 1997, № 12.
6. К вопросу о количественной оценке взаимозависимости источников внешнего электроснабжения / М. С. Ершов, А. В. Егоров, В. А. Анцифоров, А. В. Суржиков. — Промышленная энергетика, 2011, № 6.
7. Брэдли Д. Упредительное обслуживание — ключ к качеству электроснабжения. Проблемы напряжения. — Энергосбережение, 2005, № 1.
8. Учет несимметрии питающего напряжения в системах защиты от потери устойчивости промышленных электротехнических систем / М. С. Ершов, А. В. Егоров, Н. В. Валов, А. Н. Комков. — Промышленная энергетика, 2011, № 9.
9. Справочник по проектированию электрических сетей / Под ред. Д. Л. Файбисовича. 2-е изд., перераб. и доп. — М.: ЭНАС, 2007.
10. Ершов М. С., Егоров А. В., Федоров В. А. Некоторые вопросы повышения устойчивости электроприводов многомашинного комплекса с непрерывным технологическим процессом при возмущениях в системе электроснабжения. — Промышленная энергетика, 1992, № 7.

antsiforov@mail.ru