

Министерство образования Российской Федерации
Ивановский государственный энергетический университет

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ЭНЕРГОСИСТЕМ

ТРУДЫ ИГЭУ

Выпуск 5

*Под редакцией
доктора техн. наук, профессора В.А. Шуина,
доктора техн. наук, профессора М.Ш. Мисриханова*

Москва
Энергоатомиздат
2002

УДК 621.311

ББК 31.37

П 42

Рецензенты:

*д-р техн. наук, проф. Т.А. Филиппова (Новосибирский
государственный технический университет - НЭТИ);*

д-р техн. наук, проф. В.А. Семенов (СО-ЦДУ ЕЭС России);

д-р техн. наук, проф. Г.И. Ванюрихин (МГУ им. М.В. Ломоносова).

Повышение эффективности работы энергосистем: Тр. ИГЭУ. Вып. 5 /
Под ред. В.А. Шуина, М.Ш. Мисриханова. – М.: Энергоатомиздат,
2002. – 520 с.

ISBN 5-283-02588-8

Материал сборника включает разделы, посвященные общим проблемами и экономическим аспектам управления функционированием и развитием электроэнергетики России и регионов, вопросам расчета и моделирования установившихся режимов и переходных процессов в электроэнергетических системах и их элементах, эксплуатации, диагностики и производства электрооборудования для электрических станций, подстанций и сетей, релейной защиты, автоматики и противоаварийного управления электроэнергетическими системами, совершенствования оборудования и методов строительства гидроэлектростанций.

Книга предназначена для специалистов, занимающихся исследованием, разработкой, проектированием и эксплуатацией электроэнергетических систем, электрических станций, подстанций и сетей, комплексов и устройств их автоматического управления.

Редакционная коллегия:

д-р техн. наук, проф. В.Н. Нуждин, д-р техн. наук, проф. М.Ш. Мисриханов,

д-р техн. наук, проф. Б.М. Ларин, д-р техн. наук, проф. А.В. Мошкарин,

д-р техн. наук, проф. В.А. Савельев, д-р техн. наук, проф. В.А. Строев,

д-р техн. наук, проф. С.В. Тарарыкин, д-р техн. наук, проф. В.А. Шуин,

д-р техн. наук, проф. А.В. Шунтов, д-р техн. наук, проф. Ю.Я. Щелькалов,

д-р техн. наук, проф. И.В. Якимец.

ISBN 5-283-02588-8

© Авторы, 2003

УДК 621.315.1

Анализ методической погрешности при ОМП на ВЛ от неучета пофазного различия ее параметров

*М.Ш. Мисриханов, д-р техн. наук, В.А. Попов, канд. техн. наук,
Р.В. Медов, канд. техн. наук, Д.Ю. Костюнин, инж.*

Воздушные линии электропередачи (ВЛ) подвергаются воздействию ветра, гололеда, резкого перепада температур, внутренних и атмосферных перенапряжений. При этом могут возникать различные повреждения: междуфазные короткие замыкания (КЗ), короткие замыкания одного или нескольких проводов на землю, обрывы проводов, а также сложные повреждения, возникающие при наложении простых повреждений. Причинами повреждений, кроме того, могут быть лесные пожары, оползни, нарушения правил технической эксплуатации ВЛ или неправильные действия обслуживающего персонала. Для ВЛ 110 кВ и выше наиболее вероятным видом повреждения являются КЗ на землю (85 %): однофазное (65 %) и двухфазное (20 %) [1]. Техника определения мест повреждения (ОМП) на ВЛ в настоящее время стала составной частью эксплуатационного обслуживания электрических сетей. От быстроты восстановления поврежденных линий существенно зависят технико-экономические показатели электроснабжения потребителей. Значительную часть времени восстановления повреждений линии составляет процесс отыскания места повреждения. Особенно важно быстро и точно определить место устойчивого повреждения на линиях электропередачи, отключение которых связано с обесточением или ограничением потребителей электроэнергии. В этих случаях ускорение поиска позволяет значительно сократить аварийный недоотпуск электроэнергии, что дает большой экономический эффект. При аварийном отключении одной из параллельных или кольцевых линий сокращение аварийного простоя линии приводит к соответствующему увеличению надежности работы системы и сокращению потерь электроэнергии.

При неустойчивых КЗ, после отключения которых линия включается успешным действием автоматического повторного включения (АПВ) или вручную, быстрое отыскание места повреждения имеет профилактическое значение, так как позволяет своевременно организовать ремонт линии и предотвратить развитие повреждения.

Погрешности ОМП, как показано в [2, 3], можно разделить на два класса: измерительные и методические. Измерительные погрешности определяются классом точности трансформатора тока, трансформатора напряжения и регистрирующего прибора и проявляются в искажении измеряемого параметра по амплитуде и фазе. Методические погрешности определяются неадекватностью используемой расчетной математической модели реальному объекту. К методическим погрешностям можно отнести неточность задания погонных параметров и длин участков ВЛ, неучет таких факторов, как распределенность параметров ВЛ, несимметрия параметров по фазам, взаимовлияние с параллельными ВЛ, характер заземления грозозащитных тросов по длине линии, протекание токов по контурам заземления ПС и опор линий и др. Основным способом уменьшения измерительных погрешностей является повышение класса точности используемых приборов, внедрение цифровых осциллографов, что всегда связано с существенными финансовыми затратами. В настоящее время не все энергосистемы могут позволить себе широкое техническое переоснащение. Методические погрешности не требуют столь существенных капитальных вложений и могут быть уменьшены за счет учета в методике ОМП указанных выше факторов [5, 6].

Для ОМП на ВЛ 110 кВ и выше наибольшее распространение получили методы, основанные на измерении параметров аварийного режима (токов и напряжений) с последующим расчетом по этим параметрам расстояния до места повреждения. Существующие методы ОМП по параметрам аварийного режима с учетом различных признаков подразделяются на:

- а) методы при односторонних измерениях параметров режима;
- б) методы при двусторонних (в общем случае многосторонних) измерениях параметров режима.

При одностороннем измерении параметров наиболее эффективным является использование фиксирующих омметров, показания которых соответствуют расстоянию до места повреждения. Так при использовании микропроцессорного измерителя расстояния “Мир-1” к прибору подводится напряжение \dot{U}_ϕ и ток \dot{I}_ϕ поврежденной фазы, скомпенсированный током нулевой последовательности \dot{I}_0 [4]:

$$l = \frac{\dot{U}_\phi}{Z_1(\dot{I}_\phi + \dot{k}_0 \dot{I}_0)}, \quad (1)$$

где l – расстояние до места КЗ, измеренное прибором; $\dot{k}_0 = (\dot{Z}_0 - \dot{Z}_1) / \dot{Z}_1$; $\dot{Z}_1 = r_{\Pi} + j0,145 \cdot l g(D_{CP} / \rho_{\text{Э.Л}})$ – удельное сопротивление ВЛ прямой последовательности; $\dot{Z}_0 = r_{\Pi} + j0,15 + j0,435 \cdot l g(D_3 / \rho_{CP})$ – удельное сопротивление ВЛ нулевой последовательности; $D_{CP} = \sqrt[3]{D_{AB} \cdot D_{BC} \cdot D_{AC}}$ – среднее геометрическое расстояние между проводами фаз А, В и С; $\rho_{CP} = \sqrt[3]{\rho_{\text{Э.Л}} \cdot D_{CP}^2}$ – средний геометрический радиус системы трех проводов линии.

При наличии взаимовлияния поврежденной ВЛ с параллельно проходящей линией выражение (1) может быть уточнено за счет ввода тока нулевой последовательности \dot{I}'_0 параллельной ВЛ (возможно осуществить только, если обе линии подключены к общим шинам) [4]:

$$l = \frac{\dot{U}_\phi}{\dot{Z}_{\text{ydl}}(\dot{I}_\phi + \dot{k}_0 \cdot \dot{I}_0 + \dot{k}_M \cdot \dot{I}'_0)}, \quad (2)$$

где $\dot{k}_M = (\dot{Z}_M / \dot{Z}_{\text{ydl}})$; $\dot{Z}_M = 0,15 + j0,435 \cdot l g(D_3 / D_M)$ – удельное сопротивление взаимной индукции нулевой последовательности между параллельными ВЛ; $D_M = \sqrt[2]{D_{Aa} \cdot D_{Ab} \cdot D_{Ac} \cdot D_{Ba} \cdot D_{Bb} \cdot D_{Bc} \cdot D_{Ca} \cdot D_{Cb} \cdot D_{Cc}}$ – среднее расстояние между параллельными ВЛ.

	A	B	C
A	Z_{AA}	Z_{AB}	Z_{AC}
$Z_\phi = B$	Z_{BA}	Z_{BB}	Z_{BC}
C	Z_{CA}	Z_{CB}	Z_{CC}

(3)

Определение мест повреждения на основе двусторонних измерений выполняется расчетным путем либо графически. В последние годы в связи с повышением уровня компьютеризации в энергосистемах практически все расчеты производятся на ПЭВМ. Для проведения расчетов применяются специальные или универсальные программы. Возможно также оп-

ределение мест повреждений с помощью таблиц, составленных на основе предварительно выполненных расчетов для отдельных ВЛ.

Для оценки методической погрешности от неучета пофазного различия параметров ВЛ необходимо рассмотреть причины ее появления. Любая трехфазная линия электропередачи может быть представлена матрицей собственных и взаимных сопротивлений фаз.

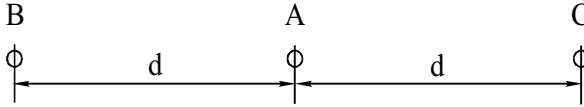


Рис. 1. Горизонтальное расположение фаз на опоре

При горизонтальном расположении фазных проводов (рис. 1) и неучете в целях упрощения активных составляющих сопротивлений ВЛ матрица (3) имеет следующий вид:

$$X_{\Phi} = j0,145 \cdot \begin{pmatrix} \lg \frac{D_3}{\rho_{\Phi,II}} & \lg \frac{D_3}{d} & \lg \frac{D_3}{d} \\ \lg \frac{D_3}{d} & \lg \frac{D_3}{\rho_{\Phi,II}} & \lg \frac{D_3}{2d} \\ \lg \frac{D_3}{d} & \lg \frac{D_3}{2d} & \lg \frac{D_3}{\rho_{\Phi,II}} \end{pmatrix}, \quad (4)$$

Приведем в качестве примера матрицы удельных реактивных сопротивлений (3) для ВЛ разных классов напряжений при $D_3 = 1000$ м:

- ВЛ 330 кВ с проводом $2 \times \text{AC}-300/39$, $d = 8,4$ м:

$$X_{\Phi} = j0,145 \cdot \begin{pmatrix} 4,182 & 2,076 & 2,076 \\ 2,076 & 4,182 & 1,775 \\ 2,076 & 1,775 & 4,182 \end{pmatrix}; \quad (5)$$

- ВЛ 500 кВ с проводом $3 \times \text{AC}-330/43$, $d = 12$ м:

$$X_{\Phi} = j0,145 \cdot \begin{pmatrix} 3,903 & 1,921 & 1,921 \\ 1,921 & 3,903 & 1,620 \\ 1,921 & 1,620 & 3,903 \end{pmatrix}; \quad (6)$$

- ВЛ 750 кВ с проводом $5 \times \text{АС}-300/39$, $d = 14,6$ м:

$$X_{\phi} = j0,145 \cdot \begin{array}{|c|c|c|} \hline 3,723 & 1,836 & 1,836 \\ \hline 1,836 & 3,723 & 1,569 \\ \hline 1,836 & 1,569 & 3,723 \\ \hline \end{array} \cdot \quad (7)$$

Можно отметить, что сопротивление взаимной индукции между крайней и средней фазой больше примерно на 15 % взаимного сопротивления между крайними фазами, поэтому применение для моделирования ВЛ фазных координат в любом случае вносит некоторое уточнение ОМП, так как при этом исключается погрешность от неучета пофазного различия параметров линий. На значение этой погрешности влияют следующие факторы:

- наличие или отсутствие полной транспозиции фаз;
- наличие сильных взаимных электромагнитных связей с соседними линиями;
- учет характера заземления грозозащитного троса и протекания тока по контуру заземления опор и ПС.

Для оценки влияния транспозиции фаз на методическую погрешность ОМП от неучета пофазного различия параметров были произведены расчеты с применением двустороннего и одностороннего методов. В качестве расчетной модели используется ВЛ 330 кВ, имеющая следующие параметры: длина – 200 км, промежуточные опоры – ПБ-330-1; фазные провода – $2 \times \text{АС } 400/51$ ($\rho_{\text{ДР}} = 0,075 / 2 = 0,0375$ Ом/км, $a = 400$ мм, $r_0 = 13,75$ мм), расположенные горизонтально; расстояние между фазами – 8,4 м; два троса – С70 изолированы ($r_{\text{ТР}} = 5,6$ мм, $\rho_{\text{ТР}} = 2,8$ Ом/км); высота подвеса проводов – 19,5 м, длина гирлянды – 3,4 м. Примыкающие системы имеют одинаковые параметры по сопротивлению: $Z_1 = Z_2 = Z_0 = j14$ Ом. Расчеты производятся для трех случаев: при полном цикле транспозиции фаз ВЛ (три участка по 66,6 км), при неполном цикле транспозиции фаз ВЛ (два участка по 100 км) и при отсутствии транспозиции. В предшествующем режиме нагрузка на ВЛ отсутствует.

При использовании двустороннего способа ОМП для оценки погрешности применяется следующая методика. Сначала составляется модель рассматриваемого участка ЭЭС, включающая ВЛ и эквиваленты примыкающих систем. Линия моделируется в фазных координатах, а эквиваленты – сопротивлениями прямой, обратной и нулевой последовательностей. При перемещении точки однофазного КЗ по длине ВЛ вы-

полняются расчеты токов нулевой последовательности по концам линии для каждой точки КЗ. Повреждения устраиваются поочередно на фазах А, В, С.

Для оценки методической погрешности от неучета пофазного различия параметров ВЛ необходимо сравнить результаты расчетов по модели линии в фазных координатах с аналогичным расчетом при представлении ВЛ в симметричных составляющих. Отличие между заданным и рассчитанным расстоянием Δl представляет собой методическую погрешность ОМП от неучета пофазного различия параметров. Относительная погрешность в процентах определяются следующим образом:

$$\Delta l = \frac{l_{рас} - l_{ис}}{l_{ис}} \cdot 100, \quad (8)$$

где $l_{рас}$, $l_{ис}$ – расстояния до места повреждения соответственно расчетные и истинные.

При использовании одностороннего метода ОМП составляется аналогичная модель исследуемого участка ЭЭС и производятся расчеты при перемещении точки однофазного КЗ (фаза А, В, С) вдоль линии. Но при этом вычисляется не только ток нулевой последовательности, но также напряжение и ток поврежденной фазы. Для вычисления расчетных расстояний используется выражение (1). При этом необходимо заранее вычислить удельные сопротивления ВЛ прямой и нулевой последовательностей. Погрешность Δl вычисляется аналогично предыдущему случаю.

Изменения абсолютной и относительной погрешностей по длине ВЛ при полном, неполном цикле и отсутствии транспозиции приводятся соответственно на рис. 2–4 для двустороннего метода ОМП и на рис. 5–7 для одностороннего метода ОМП.

Выводы

1. При одностороннем и двустороннем методах ОМП всегда существуют методические погрешности, которые определяются неадекватностью используемой расчетной математической модели реальному объекту, из-за:

- неточности задания погонных параметров и длин участков ВЛ;
- неучета распределенности параметров ВЛ;
- несимметрии параметров по фазам;
- взаимовлияния данной линии с параллельными ВЛ;

Анализ методической погрешности ОМП на ВЛ
от неучета пофазного различия ее параметров

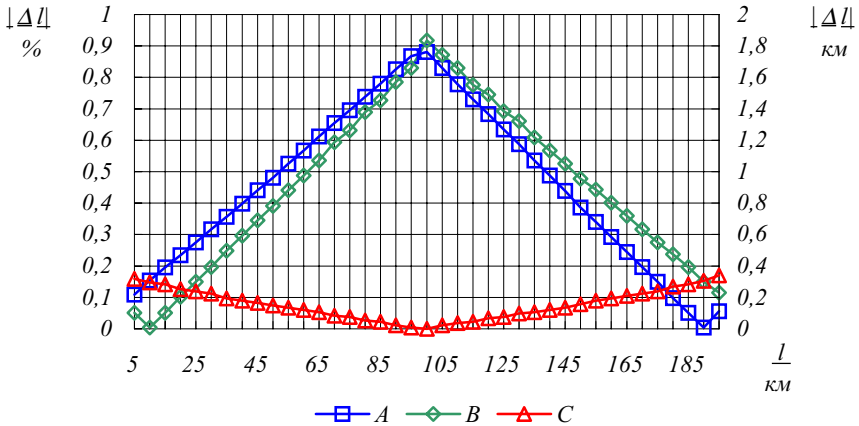


Рис. 2. Методическая погрешность при двустороннем способе ОМП для ВЛ 330 кВ длиной 200 км при неполном цикле транспозиции

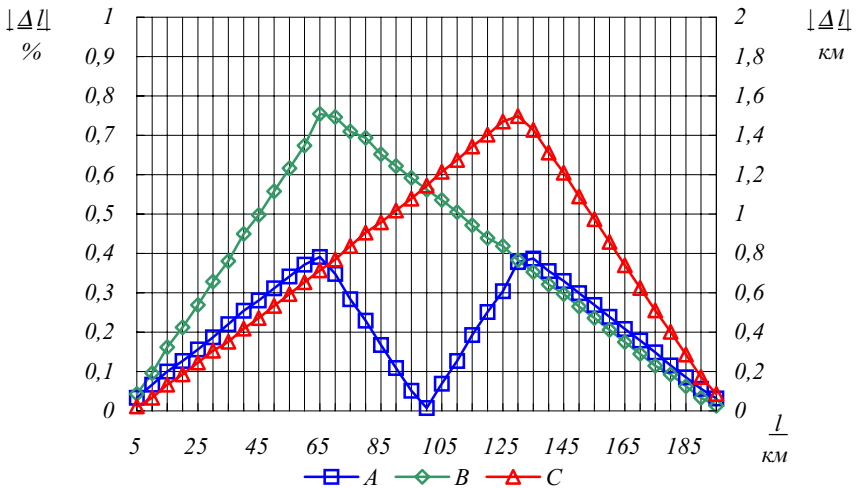


Рис. 3. Методическая погрешность при двустороннем способе ОМП для ВЛ 330 кВ длиной 200 км при полном цикле транспозиции

Анализ методической погрешности ОМП на ВЛ
от неучета пофазного различия ее параметров

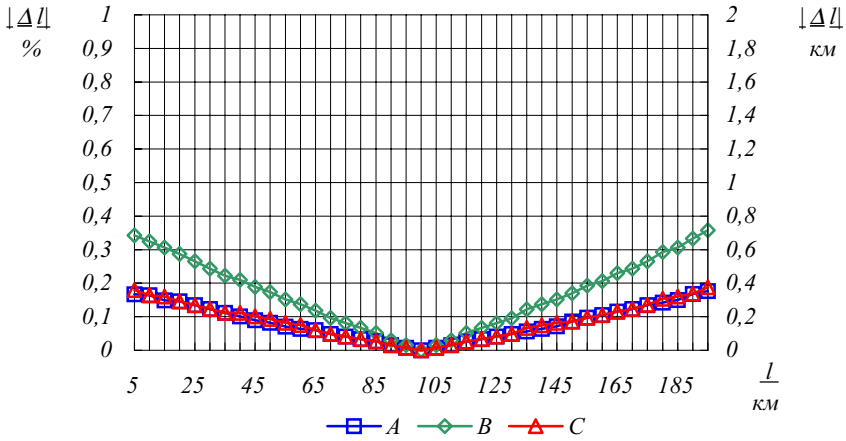


Рис. 4. Методическая погрешность при двустороннем способе ОМП для ВЛ 330 кВ длиной 200 км при отсутствии транспозиции

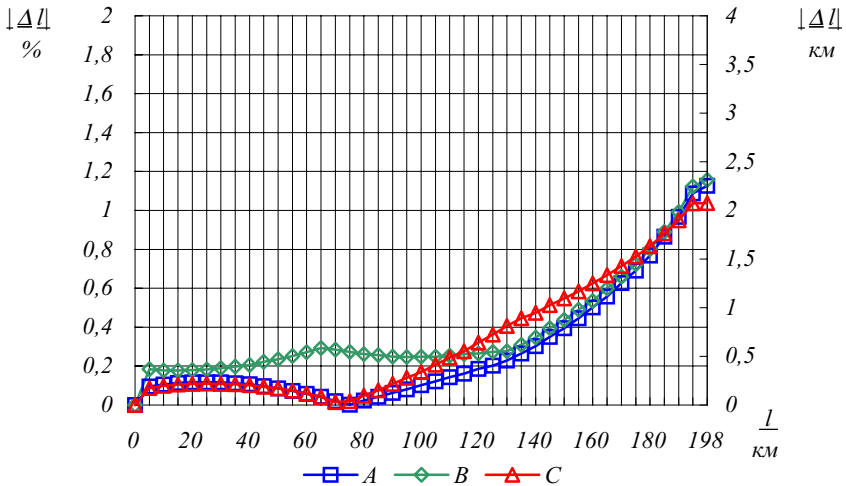


Рис. 5. Методическая погрешность при одностороннем способе ОМП для ВЛ 330 кВ длиной 200 км при полном цикле транспозиции

Анализ методической погрешности ОМП на ВЛ
от неучета пофазного различия ее параметров

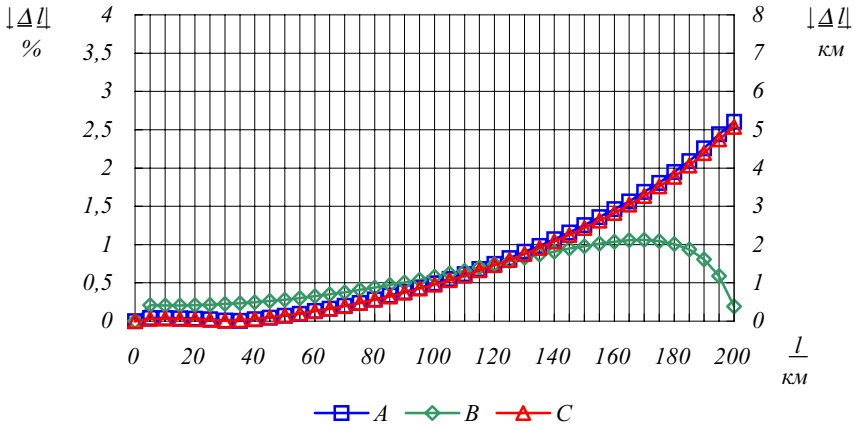


Рис. 6. Методическая погрешность при одностороннем способе ОМП для ВЛ 330 кВ длиной 200 км при отсутствии транспозиции

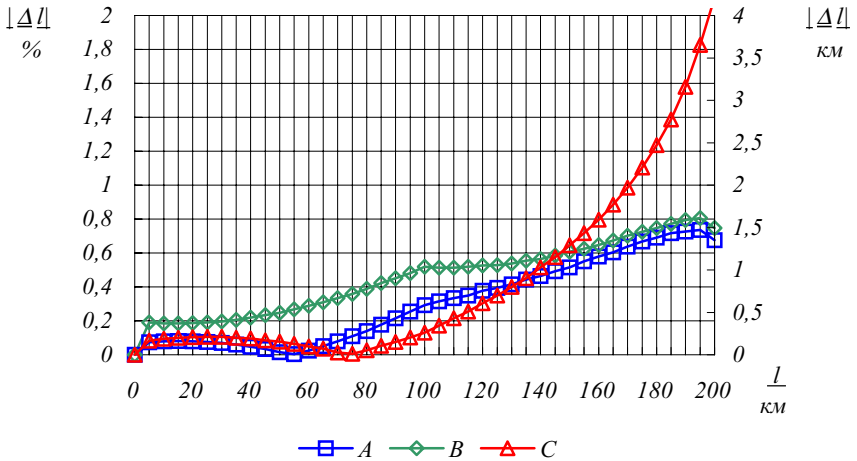


Рис. 7. Методическая погрешность при одностороннем способе ОМП для ВЛ 330 кВ длиной 200 км при неполном цикле транспозиции

- характера заземления грозозащитных тросов по длине линии;
- протекания токов по контурам заземления ПС, опор линий и др.

2. При двустороннем методе ОМП транспозиция фаз приводит к увеличению методической погрешности от неучета пофазного различия, причем погрешность достигает максимального значения в местах установки транспозиционных опор.

3. При использовании одностороннего метода ОМП максимальное значение погрешности существенно больше, чем при двустороннем способе. Причем погрешность всегда возрастает к концу линии. Наличие транспозиции приводит к уменьшению методической погрешности от неучета пофазного различия.

4. Расчеты для ВЛ напряжением 110, 220, 500, 750 кВ подтвердили полученные выводы по п.2 и 3.

5. Авторами разработан и внедряется в производство метод и программный комплекс для ПК по определению мест повреждения на ВЛ 110 – 750 кВ методом фазных составляющих, который позволяет существенно снизить методическую погрешность ОМП и соответственно повысить точность ОМП и ускорить поиск места повреждения ВЛ.

Библиографический список

1. **Ульянов С.А.** Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. – М.: Энергия, 1970.

1. **Малый А.С.** и др. Определение мест повреждения линий электропередачи по параметрам аварийного режима. – М.: Энергия, 1972.

2. **Шабад М.А., Шмурьев В.Я.** Новые аппаратные и программные решения при определении места повреждения // Энергетик. – 2001. – № 4.

3. **Айзенфельд А.И.** Алгоритмические погрешности определения мест повреждения воздушных линий напряжением 110 – 750 кВ // Электр. станции. – 1998. – № 7.

4. **Уточнение** определения мест повреждения на ВЛ при использовании фазных составляющих / М.Ш. Мисриханов, В.А. Попов, Н.Н. Якимчук, Р.В. Медов // Электр. станции. – 2001. – № 3.

5. **Определение** мест повреждения на ВЛ 330 – 750 кВ методом фазных составляющих / М.Ш. Мисриханов, В.А. Попов, Н.Н. Якимчук, Р.В. Медов // Повышение эффективности работы энергосистем: Тр. ИГЭУ. Вып. 4. – Иваново, 2001.

УДК 621.311.22

Частотные свойства ортогонального разложения электрических величин

Е.А. Аржанников, д-р техн. наук,
А.Е. Аржанникова, А.М. Чухин, кандидаты техн. наук

Во всех фиксирующих микропроцессорных приборах определения места короткого замыкания (КЗ) и во многих микропроцессорных защитах мгновенные текущие значения входных токов и напряжений, фиксированные в виде отсчетов АЦП, проходят первичную обработку, призванную выделить составляющую промышленной частоты и превратить ее в комплексное число, состоящее из активной и реактивной частей. Например, напряжение фазы А должно быть представлено в виде активной составляющей U_{Aa} и реактивной составляющей U_{Ap} . Последовательность мгновенных замеров превращается в интегральную (суммированную за период) комплексную величину.

Во всех приборах это производится методом *ортогонального разложения*, основные принципы которого пояснены в [1]. Ниже рассматриваются свойства ортогонального разложения как простейшего частотного фильтра. Именно они определяют поведение устройства при электромагнитном переходном процессе, возникающем в момент начала КЗ.

Например, для напряжения U_A , представленного после АЦП последовательностью дискретных отсчетов $u_A(k \Delta t_d)$, формулы ортогонального разложения имеют вид

$$\left. \begin{aligned} U_{Aa} &= M \sum_{k=1}^n a_k u_A(k \Delta t_d); \\ U_{Ap} &= M \sum_{k=1}^n b_k u_A(k \Delta t_d). \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

В приведенных формулах Δt_d – шаг дискретизации, k – номер отсчета, n – число отсчетов за период, M – масштабный множитель, a_k , b_k – коэффициенты, соответствующие функциям $\sin(\omega t)$ и $\cos(\omega t)$ в моменты $k \Delta t_d$.

Ряд значений коэффициентов a_k и b_k готовится заранее. Например, при 12 отсчетах за период коэффициенты a_k должны повторять значения синуса через 30 градусов, то есть должны быть равны:

$$a_k = 0; 0,5; 0,866; 1; 0,866; 0,5; 0; -0,5; -0,866; -1; -0,866; -0,5.$$

Реально в фиксирующих приборах типа ИМФ используется целочисленный ряд:

$$a_k = 0, 4, 7, 8, 7, 4, 0, -4, -7, -8, -7, -4.$$

Здесь в определенном масштабе синус 60 градусов заменен числом $7/8 = 0,875$ при точном значении 0,866. Это вносит небольшую погрешность, но позволяет производить расчеты в целочисленной арифметике, так как отсчеты АЦП тоже являются целыми числами.

Соответственно ряд коэффициентов b_k отражает в том же масштабе косинусоиду

$$b_k = 8, 7, 4, 0, -4, -7, -8, -7, -4, 0, 4, 7.$$

Масштабный множитель M определяется масштабом АЦП, масштабом коэффициентов a_k , b_k и числом отсчетов n :

$$M = m_{\text{АЦП}} \cdot m_k / n,$$

где $m_{\text{АЦП}}$ – число на выходе АЦП при единичном входном токе или напряжении, m_k – масштаб ряда коэффициентов (для приборов ИМФ равен 1/8).

Ортогональное разложение не только позволяет выразить входную величину в комплексной форме, но и осуществляет частотную цифровую фильтрацию измеряемых величин. Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) ортогонального разложения для случая использования 12 отсчетов на период приведена на рис. 1. Рисунки 1, а и 1, б отличаются шириной диапазона по частоте и точностью. Рис. 1, б выполнен упрощенно – реальные зависимости заменены полусинусоидами, у которых точны только максимальные и минимальные (нулевые) значения. Рис. 1, а более точен – зависимости имеют неправильную форму, зависящую от начальной фазы преобразуемой величины.

Как следует из рис. 1, а, ортогональное разложение с частотой в 12 отсчетов за период в диапазоне 0-300 Гц действует как частотный фильтр и вырезает постоянную составляющую и все частоты, кратные 50 Гц (кроме самой частоты в 50 Гц). Полосу пропускания на уровне 0,7 можно оценить примерно от 20 до 80 Гц. Однако в более широком диапазоне частот АЧХ повторяется (рис. 1, б). При этом диапазон 300-600 Гц является зеркальным отражением диапазона 300-0 Гц, далее характеристика бесконечно повторяется с периодом 600 Гц.

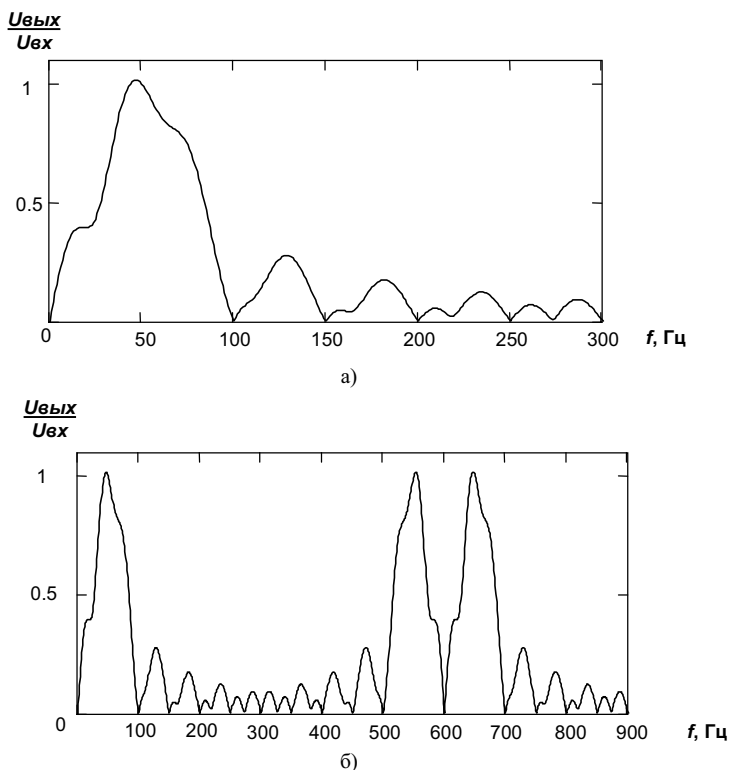


Рис. 1. Амплитудно-частотная характеристика ортогонального разложения

Периодичность характеристики пропорциональна произведению числа отсчетов за период и промышленной частоте: $600 = 12 \cdot 50$. Если в приборе АЦП действует со скоростью 24 отсчетов за период, то полупериод АЧХ равен 600 Гц, а полный период 1200 Гц. По мере уменьшения числа отсчетов на период фильтрующие свойства ухудшаются.

Во всех фиксирующих приборах и в устройствах защиты на входе (до АЦП) устанавливаются простейшие аналоговые фильтры, не пропускающие слишком высокие частоты. Поэтому в сумме двух фильтраций при числе отсчетов 12 и выше можно не считаться с полной характеристикой рис. 1, б, ограничиваясь ее начальной частью рис. 1, а.

Остановимся подробнее на фильтрации аperiodических составляющих токов. Характеристики рис. 1 имеют нуль при нулевой частоте, то

есть постоянная составляющая тока или аperiodическая составляющая с медленным затуханием полностью отфильтровывается. Фильтрация постоянной составляющей следует из выражения (1), которое при постоянстве напряжения на входе $u_A(k \Delta t_d) = u_A$ превращается в (2):

$$\left. \begin{aligned} U_{Aa} &= M \cdot u_A \sum_{k=1}^n a_k, \\ U_{Ap} &= M \cdot u_A \sum_{k=1}^n b_k. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Чтобы обеспечить фильтрацию постоянной составляющей, необходимо иметь нулевую сумму всех n членов рядов a_k и b_k . В приведенных выше примерах рядов это условие выполняется. Очевидно, оно будет выполняться всегда, когда отсчеты равномерно распределены по всему периоду промышленной частоты. Число отсчетов должно быть $n \geq 3$ (при двух отсчетах коэффициенты ряда a_k приобретают нулевые значения и промышленная частота не выделяется).

Затухающая аperiodическая составляющая не может быть полностью отфильтрована именно в силу своего затухания. Однако при больших постоянных времени затухания фильтрация должна быть успешной, а при малых постоянных времени погрешности должны быстро затухать. Для проверки были проведены расчеты влияния затухающей аperiodической составляющей, результаты которых представлены в табл. 1. Принималось, что момент КЗ самый неблагоприятный и аperiodическая составляющая при $t = 0$ равна амплитуде установившегося тока, т.е. ток на входе устройства описывается формулой

$$i = -141,4 \left[\cos(314t) - e^{-\frac{t}{\tau}} \right].$$

Проводились расчеты результатов ортогонального разложения при 12 отсчетах за период для первых 10 периодов после начала аварии, и каждый раз подсчитывалась погрешность как разница между результатом ортогонального разложения и установившимся значением тока в 100 А.

Таблица 1. Погрешность ортогонального разложения от наличия аperiodической составляющей

τ, c	Погрешность (%) в разные периоды проведения замера									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,02	3,85	1	0,3	0,1	0	0	0	0	0	0

Продолжение табл. 1

τ, c	Погрешность (%) в разные периоды проведения замера									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,05	2,6	1,6	1	0,7	0,4	0,3	0,2	0,13	0	0
0,1	1,5	1,2	1	0,8	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,2
0,2	0,8	0,7	0,6	0,6	0,5	0,5	0,4	0,4	0,35	0,3
0,3	0,53	0,5	0,46	0,4	0,4	0,4	0,35	0,3	0,3	0,3
0,4	0,4	0,4	0,4	0,35	0,33	0,31	0,3	0,28	0,27	0,25
0,5	0,32	0,31	0,3	0,3	0,27	0,26	0,25	0,24	0,23	0,22

Данные табл. 1 говорят о том, что при малых постоянных затухания погрешность определения тока доходит до 3,85 %, но существует только в первые три периода после начала КЗ. При больших постоянных затухания погрешность существует в течение всего КЗ, но не превосходит долей процента. Обычно в фиксирующих приборах устанавливается время фиксации в 0,07-0,08 с, то есть ток определяется на 4-5-м периодах. Согласно табл. 1 погрешность в это время может доходить до 0,8 %, причем она максимальна при вполне вероятных в сетях 110–220 кВ постоянных затухания в 0,05–0,1 с.

Аналогичные расчеты показывают, что увеличение числа отсчетов до 24 за период снижает погрешность от наличия аperiodической составляющей в 2-3 раза.

Немалый интерес представляет вопрос о частотной погрешности ортогонального преобразования из-за отклонения частоты в системе от 50 Гц. В этом случае 12 или 24 отсчета происходят не за период входной величины, но за большее или за меньшее время. Например, при частоте в сети в 48 Гц последний отсчет приходится не на 360 градусов изменения входной величины, но на $360 \cdot 48 / 50 = 345$ градусов. В результате появляется погрешность, меняющаяся во времени, как это показано на рис. 2. На нем приведено изменение во времени результата ортогонального разложения входного напряжения в 100 В с частотой в 48 и 49 Гц. Предполагалось, что программно прибор настроен на частоту 50 Гц с 12 отсчетами за период этой частоты. Из-за несовпадения периодов отсчетов и входной величины измерение происходит с погрешностью, изменяющейся волнообразно, поскольку синусоида входной величины постепенно отстает от расчетной. Период волны результата разложения соответствует полупериоду отставания. Поэтому чем больше разница частот, тем быстрее изменяется волна результата.

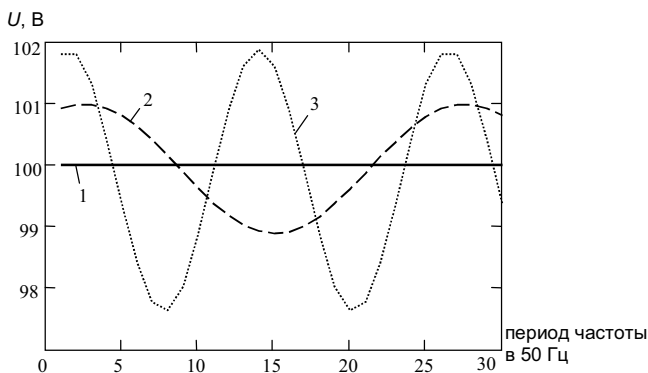


Рис. 2. Результат измерения напряжения в 100 В для частот 50 Гц (1), 49 Гц (2) и 48 Гц (3)

Результирующая погрешность от несовпадения частоты тока или напряжения с частотой отсчетов сведена в табл. 2.

Таблица 2. Максимальная частотная погрешность ортогонального разложения

f , Гц	48	49	50	51	52
Δ , %	+1,8 -2,3	+0,9 -1,1	0 0	+0,9 -1,1	+1,7 -2,3

Наибольший интерес в фиксирующих приборах и в дистанционных защитах представляет не частотная погрешность по току и напряжению, а частотная погрешность по их отношению – сопротивлению. Если в сети пониженная частота, то замеры тока и напряжения колеблются, как это показано на рис. 2. Однако эти колебания синфазны только для величин, совпадающих между собой по фазе. Если между величинами существует фазовый сдвиг, то и колебания их значений сдвинуты между собой. Период волны на рис. 2 соответствует «уходу» измеряемой величины от 50 Гц на 180^0 . Очевидно, что если между током и напряжением имеется фазовый угол в 90^0 , то максимум положительной погрешности измерения напряжения соответствует максимуму отрицательной погрешности тока. Замер сопротивления должен колебаться с той же частотой, но с удвоенной погрешностью.

Сказанное подтверждается рис. 3, на котором показана зависимость от времени модуля сопротивления при подведении к прибору, ведущему отсчеты с ориентацией на частоту 50 Гц, напряжения и тока с частотой 48 Гц.

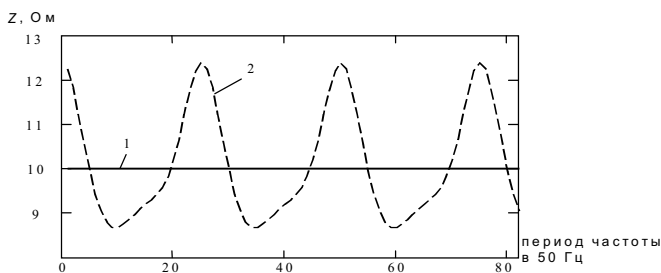


Рис. 3. Результат расчета сопротивления в 10 Ом при частоте тока и напряжения в 48 Гц для $\varphi = 0$ (1) и $\varphi = 75^\circ$ (2)

Формулы входных величин:

$$u(t) = 141,4 \sin(6,2832 \cdot 48 \cdot t + 1,309), \quad i(t) = 14,142 \sin(6,2832 \cdot 48 \cdot t),$$

что соответствует фазовому сдвигу между ними в 75° . Если бы не было указанного сдвига, замер сопротивления был бы постоянен и равен $10 \angle 75^\circ$ (прямая на рис. 3). Из-за сдвига замер сопротивления колеблется на $\pm 4\%$, что соответствует сумме погрешностей из табл. 2. Имеются колебания и в расчете угла сопротивления (от $72,6$ до $77,4^\circ$).

Приведенные данные позволяют оценить частотную погрешность микропроцессорных устройств (дистанционных защит и фиксирующих приборов). При отклонении частоты на 2 Гц погрешность замера сопротивления равна $\pm 4\%$. Это соответствует удельной погрешности $\pm 2\%$ на 1 Гц. Но сопротивление линии в основном индуктивно, и оно само изменяется с изменением частоты на $\pm 1/50 = \pm 2\%$ на 1 Гц. В неблагоприятных случаях погрешности складываются, что позволяет оценить суммарную погрешность определения расстояния до места КЗ в фиксирующих приборах или фиксации конца зоны действия в дистанционных защитах в $\pm 4\%$ на 1 Гц.

Выводы

В устройствах, использующих ортогональное разложение, погрешность замера токов или напряжений от наличия аperiodической составляющей может достигать до 3–4% при замере в первый период, но не превосходит долей процента при замере на 3–4 периодах. Частотную погрешность таких устройств в диапазоне 48–52 Гц можно оценить величиной в 4% на 1 Гц.

Библиографический список

1. Федосеев А.М. Релейная защита электроэнергетических систем. Релейная защита сетей: Учеб. пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 520 с.

УДК 621.311.22

Статистическое оценивание решения задачи определения расстояния до места короткого замыкания

*Е.А. Аржанников, д-р техн. наук, В.А. Мильников, инж.,
А.М. Чухин, канд. техн. наук*

Решение задачи определения расстояния до места короткого замыкания (ОМКЗ) на воздушных ЛЭП в настоящее время часто осуществляется микропроцессорными фиксирующими приборами (МФП) одностороннего замера. Кроме того, задача ОМКЗ решается с использованием данных от цифровых осциллографов (ЦО) по близким к МФП алгоритмам. Наибольшее количество таких устройств и программ эксплуатируется в сетях с номинальным напряжением 110÷220 кВ. В сетях 330÷750 кВ используются более сложные алгоритмы [1], которые в данной статье не рассматриваются. Основным видом повреждений в этих сетях являются однофазные короткие замыкания (~70-90 %). По этой причине дальнейшее рассмотрение ведется именно для этих КЗ.

Известно, что основной проблемой при решении задачи ОМКЗ является невозможность учета комплексного коэффициента токораспределения в месте КЗ (в переходном сопротивлении) $C = I_{K3} / I'_{K3}$ (рис. 1).

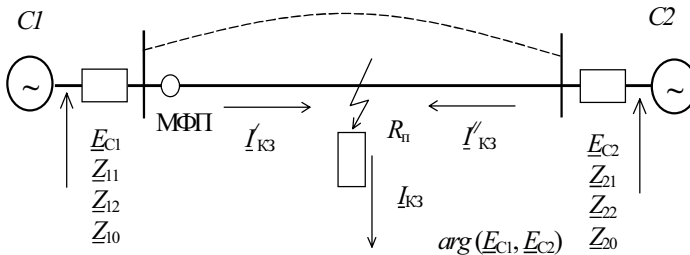


Рис. 1. Схема сети, используемая для статистического моделирования

На рис. 1 E_{C1}, E_{C2} – ЭДС систем C1, C2; $\arg(E_{C1}, E_{C2})$ – угол между ЭДС систем C1, C2; $Z_{11}, Z_{12}, Z_{10}, Z_{21}, Z_{22}, Z_{20}$ – сопротивления прямой обратной и нулевой последовательности систем C1, C2; R_n – переходное сопротивление в месте КЗ.

Даже при наличии информации о параметрах системы С2 необходимо учитывать, что эта информация может непрерывно изменяться из-за сложности реальной, а не эквивалентной энергосистемы С2. В аварийных режимах изменение параметров системы часто оказывается практически ненаблюдаемым. Это обусловлено отсутствием синхронной регистрации всех процессов в энергосистемах.

Для определения места повреждения при однофазных КЗ, как правило, используются составляющие нулевой последовательности. Это обстоятельство усложняет задачу за счет влияния взаимоиндукций, существующих в схемах нулевой последовательности. Большинство МФП весьма упрощенно учитывает эти методические погрешности. Дополнительные погрешности возникают и на аппаратном уровне, например, при насыщении трансформаторов тока (ТТ). Вместе с тем на индикаторах МФП используется большое количество значащих цифр (4 или 5), а в технической документации указывается точность 2-3 %. В ряде работ [2, 3] указываются основные методические и амплитудные погрешности и дается оценка влияния насыщения ТТ. Указанная для МФП точность относится к метрологическим характеристикам МФП, т.е. оценивает его как измеритель токов и напряжений, а не определяет точность решения задачи ОМКЗ. Все это приводит к определенному разочарованию эксплуатационного персонала, ожидающего точности решения ОМКЗ до номера определенной опоры.

В [4] указана возможность статистической интерпретации данных от МФП. Основное практическое применение статистических оценок заключается в определении зоны и направления обхода. Для решения этой задачи использован условный закон распределения положения реальной точки КЗ при зафиксированном показании МФП.

Статистический подход основан на многократных предварительных расчетах КЗ по модели данной ЛЭП с прилегающими к ее концам энергосистемами. По указанным выше причинам часть параметров расчетной схемы задается вероятностными характеристиками. Так для схемы рис. 1 случайным образом могут изменяться $Z_{11}, Z_{12}, Z_{10}, Z_{21}, Z_{22}, Z_{20}, E_1, E_2, \arg(E_1, E_2), R_{\Pi}$.

Каждый из указанных параметров представляется случайной величиной вида

$$A = \bar{A} + \tilde{A}, \quad (1)$$

где \bar{A} - детерминированное значение; \tilde{A} - случайная величина с заданным законом распределения.

Если \tilde{A} имеет нулевое математическое ожидание (что не является обязательным), то \bar{A} есть математическое ожидание A , т.е. $M\{A\} = \bar{A}$.

Определение значений \bar{A} и \tilde{A} является отдельной достаточно сложной задачей. Значительные изменения режимов могут приводить к неоправданному увеличению влияния \tilde{A} в (1). Это означает, что решение задачи ОМКЗ будет содержать весьма существенную случайную составляющую. Определение значения \bar{A} может быть выполнено многократными расчетами по имеющимся в энергосистемах программам (например, ТКЗ-3000) в различных возможных режимах. Этот подход может дать наиболее точные результаты, но требует значительных затрат времени. Кроме того, точность определения \bar{A} относительно параметров энергосистемы противоположного от места установки МФП конца ЛЭП (С2) требует значительных объемов информации о текущей конфигурации системы. Это обусловлено наличием сложных обходных связей (пунктир на рис. 1), которые не позволяют достаточно просто определить параметры системы С2. Дополнительно необходимо отметить, что статистические (или многократные) расчеты по программам типа ТКЗ-3000 выполнить весьма трудно, т.к. все изменения параметров должны задаваться в явном виде персоналом. Более целесообразным может оказаться способ классификации ЛЭП и энергосистем, рассмотренный ниже.

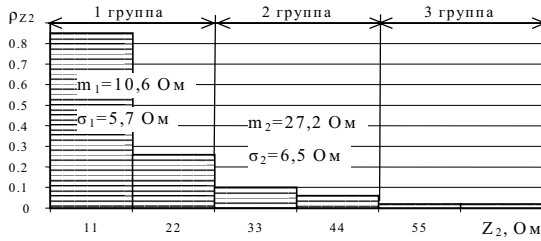
По показаниям МФП, полученным при срабатывании приборов в реальных условиях нескольких энергосистем, построены законы распределения Z_2, Z_0 (рис. 2, 3). Для ЛЭП напряжением 110 и 220 кВ приняты средние значения длин: 60-70 км для 110 кВ и 100 км для 220 кВ. По параметрам все энергосистемы разбиты на три класса по величинам сопротивлений ($Z_{i1} = Z_{i2}, Z_{i0}$). Такое разбиение было определено статистическим моделированием влияния Z на результат ОМКЗ. Если изменение Z от Z_{\min} до Z_{\max} не приводит к существенному изменению точности ОМКЗ, то этот диапазон задается своим средним значением (\bar{A}). Следует отметить, что кроме условия $Z_{i1} \cong Z_{i2}$, которое, как правило, выполняется, система задается еще и сопротивлением Z_{i0} . Для определения связи между этими сопротивлениями были определены корреляционные зависимости как в рамках класса, так и по всему множеству. Эти зависимости даны в табл. 1. Комплексный характер сопротивлений приводит к необходимости определения корреляционных зависимостей между активной и реактивной составляющими или между модулем и углом вектора.

Расчет коэффициентов корреляции произведен по выражению (2):

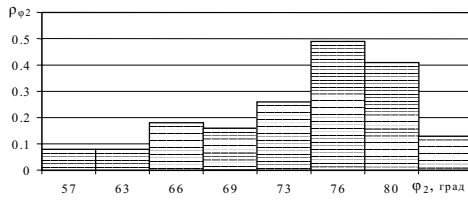
$$r_{XY} = \frac{\sum_{i \leq i \leq n} (x_i - m_x)(y_i - m_y)}{n \cdot \sigma_x \cdot \sigma_y}, \quad (2)$$

где m_x, m_y – среднее арифметическое значение, σ_x, σ_y – среднее квадратичное отклонение x и y ; n – количество значений в табл. 1.

*Статистическое оценивание решения задачи определения
расстояния до места короткого замыкания*

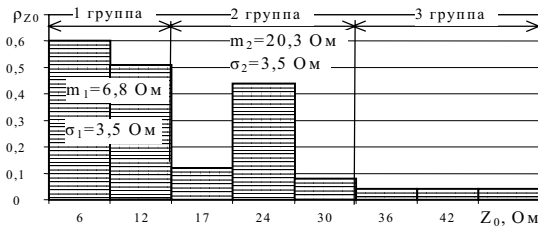


а)

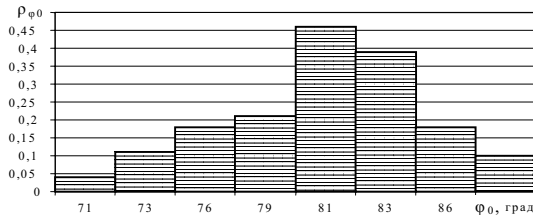


б)

Рис. 2. Статистические данные распределения сопротивлений на зажимах МФП: $\rho(Z_2), \rho(\varphi_2)$ – распределение значений модуля (а) и угла (б) обратной последовательности



а)



б)

Рис. 3. Статистические данные распределения сопротивлений на зажимах МФП: $\rho(Z_0), \rho(\varphi_0)$ – распределение значений модуля (а) и угла (б) нулевой последовательности

По этим коэффициентам возможно определить наличие статистической зависимости для соответствующих величин.

Таблица 1. Коэффициенты корреляции для сопротивлений систем по группам

Номер группы	$k_{Z_0 Z_2}$	$k_{\varphi_0 \varphi_2}$	$k_{Z_2 \varphi_2}$	$k_{Z_0 \varphi_0}$	$k_{R_2 X_2}$	$k_{R_0 X_0}$
1 группа	0,796	0,333	0,856	0,197	0,856	0,487
2 группа	0,814	0,337	0,001	-0,52	0,39	0,69
1+2 группы	0,915	0,391	0,866	0,825	0,866	0,825

Таблица 2. Параметры распределения сопротивлений систем 1 группы

1 группа	m_{Z_2}	m_{Z_0}	D_{Z_2}	D_{Z_0}	m_{φ_2}	m_{φ_0}	D_{φ_2}	D_{φ_0}
Данные статистики	10,6	6,83	32,23	12,1	77,7	80,8	21,1	46,1
Данные модели	10,6	8,08	32,23	11,76	73,8	77,1	23,5	48,9

По статистическим данным 1-й группы были смоделированы параметры системы С2. Для математических ожиданий модулей сопротивлений Z_2 , Z_0 использовалась линейная функциональная зависимость

$$m_{Z_0} = 0,796 \cdot m_{Z_2}, \quad (3)$$

так как коэффициенты корреляции достаточно близки к единице (0,796), что видно по данным табл. 1. Остальные параметры моделирования приведены в табл. 2.

Все сопротивления и углы моделировались равномерным распределением плотности вероятности. Известно [5], что для равномерного распределения дисперсия D связана с граничными значениями по выражению (4), записанному в данном случае для Z_2 :

$$D_{Z_2} = \frac{(Z_{2max} - Z_{2min})^2}{12} = \frac{4(Z_{2max} - m_{Z_2})^2}{12}, \quad (4)$$

где Z_{2max} , Z_{2min} – модули максимального и минимального значений сопротивления Z_2 , m_{Z_2} – среднее значение Z_2 .

Из (4) следует определение границ равномерного распределения сопротивлений Z_2 , Z_0 :

$$\tilde{Z}_2 = m_{Z_2} \pm \Delta \tilde{Z}_2, \quad \tilde{Z}_0 = m_{Z_0} \pm \Delta \tilde{Z}_0 \quad , \quad (5, 6)$$

$$\Delta Z_2 = Z_{2max} - m_{Z_2} = \sqrt{3D_{Z_2}}, \quad \Delta Z_0 = Z_{0max} - m_{Z_0} = \sqrt{3D_{Z_0}} . \quad (7, 8)$$

Несколько сложнее моделирование коррелированных углов φ_2, φ_0 . Очевидно, что для введения корреляционной зависимости φ_2 и φ_0 должны быть связаны линейной функцией со случайными параметрами. Использована функция вида

$$\varphi_2 = \left(\tilde{k} m_{\varphi_0} + \Delta \tilde{\varphi}_0 \right) C + D , \quad (9)$$

где \tilde{k} и $\Delta \tilde{\varphi}_0$ - случайные величины с равномерным распределением, а C и D - константы.

Параметры распределения $\tilde{\varphi}_0$, а следовательно и $\Delta \tilde{\varphi}_0$, определяются аналогично (4)-(8).

Система уравнений (10), (11) позволяет моделировать с учетом корреляции φ_2, φ_0 ($k_{\varphi_0 \varphi_2} = 0,32$ для модели, $k_{\varphi_0 \varphi_2} = 0,333$ по статистике табл. 1) комплексные сопротивления $\underline{Z}_2, \underline{Z}_0$, для системы С1:

$$\varphi_0 = 69,0 + 1,4 \cdot 11,76 \cdot rnd , \quad (10)$$

$$\varphi_2 = (\varphi_0 (0,7 + 0,6rnd) + 70,0) / 2 , \quad (11)$$

где rnd – функция, возвращающая случайное число в диапазоне 0÷1 с равномерным распределением.

Аналогично по данным табл. 1 система С1 моделировалась как детерминированная система первой группы: рассматривается ТЭЦ с заранее известной конфигурацией и линия 110 кВ длиной 70 км.

По этим данным определен условный закон распределения $\rho(l_{кз} / l_{np})$, т.е. распределение положения реальной точки КЗ ($l_{кз}$), при показании прибора $l_{np} = 60$ км (рис. 4, зависимость 1). Аналогичная зависимость 2 на рис. 4 получена по детерминированным сопротивлениям $\underline{Z}_2, \underline{Z}_0$, соответствующим математическим ожиданиям модулей и углов группы 1 для систем С1, С2. Практически законы распределения совпадают, что позволяет сделать вывод о целесообразности введения предложенной классификации на группы.

Дополнительно исследовалось влияние закона распределения модулей ЭДС E_{C1}, E_{C2} . Моделировались симметричные относительно среднего (± 10 %) и асимметричные ($-5\% + 10$ %) нормальное и равномерное рас-

предела. Практической разницы между нормальным и равномерным распределениями нет. Условные законы распределения $\rho(l_{кз}/l_{нп})$ для этого случая имеют вид, аналогичный рис. 4.

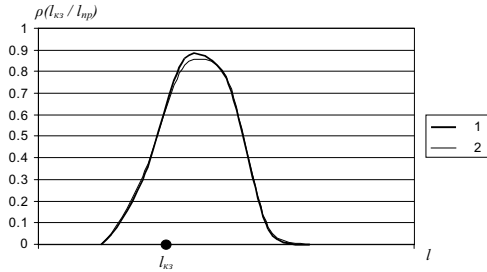


Рис. 4. Моделирование условного закона распределения $L_{кз}$ при определении сопротивления энергосистемы с учетом (1) и без учета (2) корреляционных связей

Сложнее определить законы распределения углов. Для большого количества ЛЭП известна примерная величина перетока. Переток определяется $arg(E_1, E_2)$. Максимальной неопределенностью, как известно, обладает равномерное распределение. Это в статистическом смысле «худший» случай. По этой причине для $arg(E_1, E_2)$ принято равномерное распределение.

Наиболее существенным является определение значения переходного сопротивления. К сожалению, этот параметр практически не оценивается при решении задачи ОМКЗ. Как указывалось выше, в условиях неопределенности можно принять равномерное распределение. Однако можно предположить, что большие значения $R_{п}$ могут встречаться реже, чем малые. Диапазон $R_{п}$ по различным источникам определяется 0-30 Ом или 0-50 Ом. В рассмотренных примерах принят диапазон 0-30 Ом.

Для оценки влияния закона распределения R_n на условное распределение $\rho(l_{кз}/l_{нп})$ использовались равномерный (рис. 5, а) и ступенчатый (рис. 5, б) законы распределения.

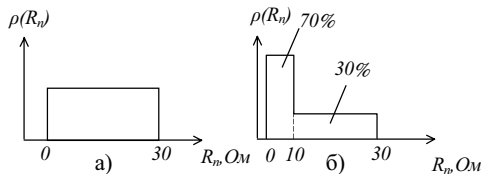


Рис. 5. Законы распределения переходного сопротивления, используемые при моделировании: а – равномерный, б – ступенчатый

По принятой статистической модели с учетом законов распределения R_n (рис. 5) строятся условные законы распределения $\rho(l_{кз}/l_{np})$, приведенные на рис. 6.

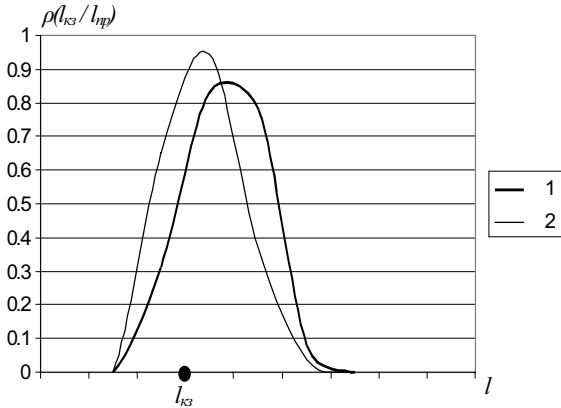


Рис. 6. Моделирование условного закона распределения $L_{кз}$ при:
1 - равномерном распределении сопротивления ($R_{п} = 0-30$ Ом);
2 - ступенчатом при вероятности 0,7 ($R_{п} = 0-10$ Ом) и 0,3 ($R_{п} = 20-30$ Ом)

Выводы

1. Системы при статистическом моделировании могут задаваться детерминированными (среднестатистическими) параметрами Z_{i1} , Z_{i2} , Z_{i0} соответствующей группы.

2. Закон распределения модулей E_i без потери статистической точности может быть принят равномерным.

3. Существенным фактором является $arg(E_1, E_2)$. Этот параметр может быть вычислен достаточно точно по перетоку мощности в доаварийном режиме.

4. Закон распределения переходного сопротивления оказывает существенное влияние на условный закон распределения $\rho(l_{кз}/l_{np})$. По этой же причине целесообразно рассчитывать оценку R_n при точном определении места КЗ после обхода и формировать статистику для определения закона распределения $\rho(R_n)$.

5. Условный закон распределения $\rho(l_{кз} / l_{нр})$ позволяет достаточно объективно оценивать точность решения задачи ОМКЗ и определять направление обхода ЛЭП.

Библиографический список

1. **Диагностика** линий электропередачи/ Ю.Я. Лямец, В.И. Антонов, В.А. Ефремов и др. //Электротехнические микропроцессорные устройства и системы: Межвуз. сб. науч. тр. - Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 1992.
2. **Аржанников Е.А., Чухин А.М.** Методы и приборы определения мест повреждения на линиях электропередачи. – М.: НТФ «Энергопрогресс», 1998. – 64 с. (Библиотечка электротехника, приложение к журналу «Энергетик»; Вып. 3).
3. **Марков М.Г., Мыльников В.А., Чухин А.М.** Восстановление формы кривой тока для уменьшения погрешности определения места повреждения на ЛЭП // Сб. ст. к VIII Междунар. конф. «Информационная среда вуза». Иваново, ИГАСА, 4-5 октября 2001. – С. 165-168.
4. **Аржанников Е.А., Чухин А.М.** Статистическое оценивание показаний приборов определения места КЗ // Сб. докл XV науч.-техн. конф. «Релейная защита и автоматика энергосистем 2002» 21-24 мая 2002. - М.: ВВЦ. – С. 147.
5. **Вентцель Е.С.** Теория вероятностей. – М.: Наука, 1969. – 576 с.

УДК 621.311.22

Моделирование случайных величин для статистических испытаний

А.М. Чухин, канд. техн. наук, Д.А. Салов, студ.

При использовании метода Монте-Карло (метод статистических испытаний) необходимо осуществлять моделирование случайных величин с заданными характеристиками. Ниже рассматриваются основные положения моделирования:

- случайной величины с заданными математическим ожиданием, дисперсией, законом распределения;
- системы двух случайных величин, связанных жесткой функциональной зависимостью;
- системы двух случайных величин, где, кроме указанных выше параметров, для каждой величины необходимо обеспечить заданный коэффициент корреляции.

Стандартной функцией для получения случайных величин на ЭВМ является равномерная функция распределения в диапазоне 0÷1. Все значения считаются независимыми. Для этого распределения легко определяются математическое ожидание ($m_x = 0,5$) и дисперсия ($D_x = 1/12$). Равномерное распределение с заданным математическим ожиданием и дисперсией легко получается из равномерного с диапазоном 0÷1 с учетом того, что $m_x = (a+b)/2$ и $D_x = (b-a)^2/12$ (рис. 1).

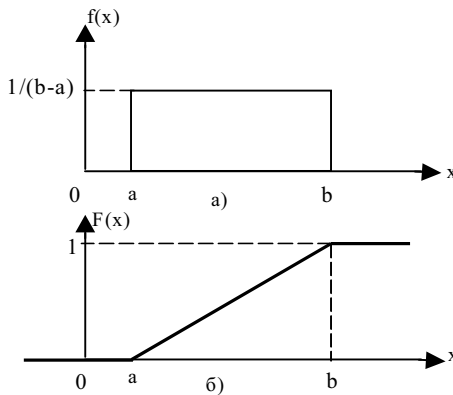


Рис. 1. Функции распределения плотности (а) и вероятности (б) для равномерного закона

Часто при моделировании требуется закон распределения, отличный от равномерного. Преобразование равномерного закона в произвольный осуществляется поиском функции $y = \varphi(x)$, которая обеспечивает необходимый закон $g(y)$.

Для решения этой задачи сначала рассматривается случай, когда задана функция $y = \varphi(x)$, где x - случайная величина с известным законом распределения, а закон распределения y необходимо найти. Решение этой задачи известно [1]. Пусть задана зависимость $y = \varphi(x)$ и известна функция распределения $f(x)$ и, следовательно, $F(x)$. Требуется определить функцию распределения $g(y)$. Рассматривается участок (a, b) , на котором располагаются все возможные значения x , и, следовательно, вероятность

$$P(a < X < b) = 1. \quad (1)$$

Решение задачи зависит от характера функции $y = \varphi(x)$. Первоначально предполагается, что функция y монотонно возрастающая (рис. 2).

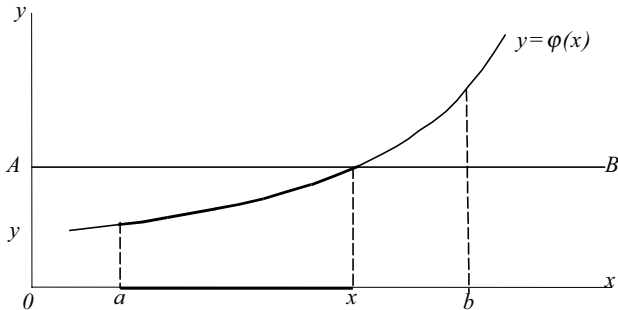


Рис. 2. Монотонно возрастающая функция $y = \varphi(x)$

Для монотонно возрастающей функции случайная точка (x, y) перемещается только по функции $\varphi(x)$. Для определения функции $g(y)$ целесообразно сначала определить функцию распределения вероятностей $G(y)$:

$$G(y) = P(Y < y), \quad (2)$$

где $P(Y < y)$ – вероятность того, что значение y лежит ниже прямой AB . Для этого абсцисса точки должна лежать на участке от a до x . Следовательно,

$$G(y) = P(Y < y) = P(a < X < x) = \int_a^x f(x) dx. \quad (3)$$

Верхний предел интеграла можно выразить через y :

$$x = \psi(y), \quad (4)$$

где ψ - функция, обратная φ .

В этом случае

$$G(y) = \int_a^{\psi(y)} f(x) dx. \quad (5)$$

Дифференцируя (5) по y , получим

$$g(y) = G'(y) = f(\psi(y)) \cdot \psi'(y). \quad (6)$$

Это и есть решение поставленной задачи.

Нетрудно убедиться, что для монотонно убывающей функции (рис. 3) решение будет иметь вид

$$g(y) = -f(\psi(y)) \cdot \psi'(y), \quad (7)$$

что объясняется сменой пределов интегрирования

$$G(y) = \int_{\psi(y)}^b f(x) dx. \quad (8)$$

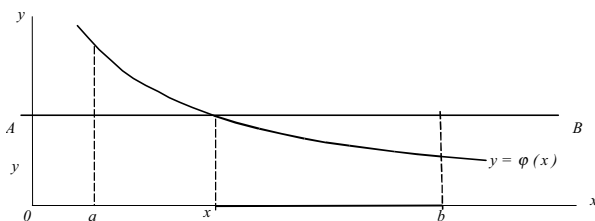


Рис. 3. Монотонно убывающая функция $y = \varphi(x)$

Если функция $y = \varphi(x)$ на участке (a, b) не монотонна (рис. 4), то при аналогичном подходе функция распределения вероятностей $G(y)$ будет определяться несколькими участками:

$$G(y) = P(Y < y) = P(x \in \Delta_1(y) + x \in \Delta_3(y) + \dots) = \sum_i \int_{\Delta_i(y)} f(x) dx. \quad (9)$$

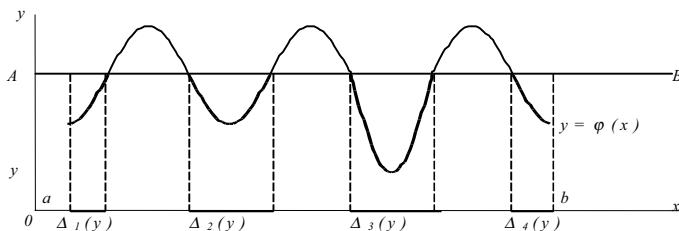


Рис. 4. Немонотонная функция $y = \varphi(x)$

При моделировании отличного от равномерного распределения решается задача, обратная данной, т.е. при известных $f(x)$ и $g(y)$ необходимо определить $y = \varphi(x)$. Поскольку $f(x)$, а следовательно, и $f(\psi(y)) = const$, то (6) можно записать так:

$$g(y) = c \cdot \psi'(y), \quad (10)$$

где $c = const$ - плотность равномерного распределения.

Интегрируя (10), получим

$$G(y) = c \cdot \psi(y). \quad (11)$$

Данное выражение позволяет по известной функции $G(y)$ определить функцию $y = \varphi(x)$.

Ниже в качестве примера рассматривается моделирование нормального закона распределения (12) с параметрами $m = 0$ и $\sigma = 1$ (рис. 5):

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}}. \quad (12)$$

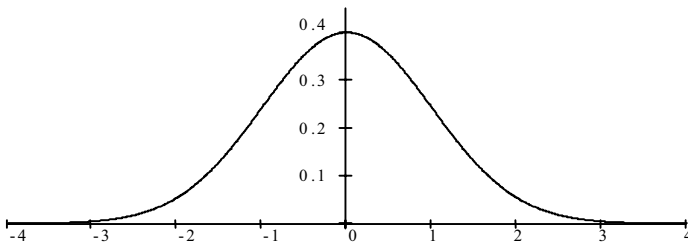


Рис. 5. Функция распределения плотности вероятности для нормального закона ($m=0$, $\sigma=1$)

Для функции распределения $f(x)$ известна функция (13) распределения вероятностей $F(x)$ (рис. 6):

$$F(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}} dx. \quad (13)$$

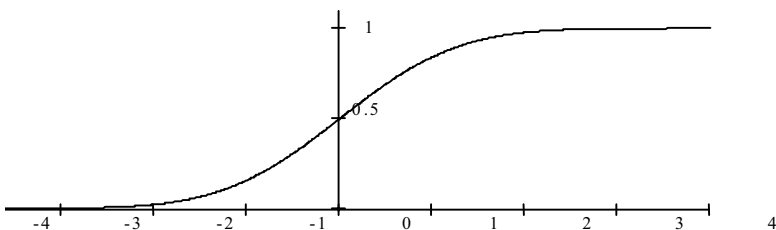


Рис. 6. Функция распределения плотности вероятности для нормального закона

Для получения обратной функции $\psi(y)$ функция распределения вероятностей преобразовывается к виду (рис. 7):

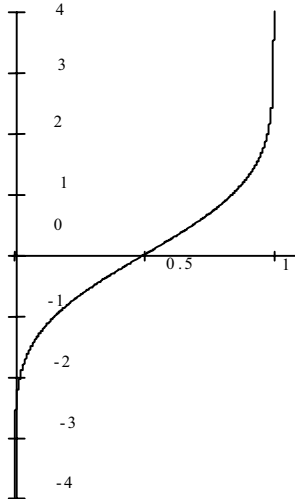


Рис. 7. Функция $\psi(y)$ для нормального закона

Наглядно алгоритм генерации нормально распределенных чисел y по равномерно распределенным числам x иллюстрируется рис. 8.

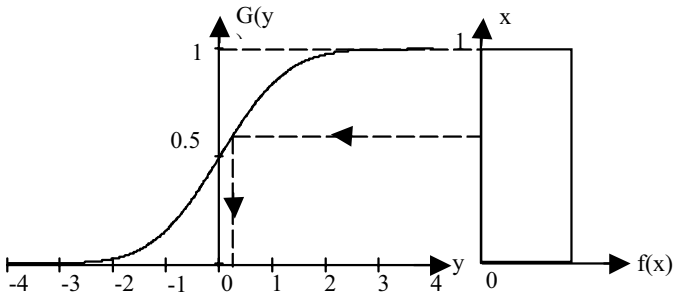


Рис. 8. Схема преобразования равномерного закона $f(x)$ в нормальный $g(y)$

Приведенные рассуждения показывают, что любой закон распределения может быть получен из равномерного, если известна функция распределения вероятностей. Как известно, функция распределения вероятностей существует для любого дискретного, непрерывного и смешанного распределений.

Моделирование коррелированных случайных величин представляет в общем случае достаточно сложную задачу. Это объясняется тем, что моделирование ведется введением функциональной зависимости между случайными величинами X и Y . Для определенности в дальнейшем предполагается, что X является случайной величиной, а Y - функцией. Наиболее разработана теория для нормальных случайных величин. При статистическом моделировании часто используются и другие распределения.

Одним из способов моделирования является использование предиктора [2]

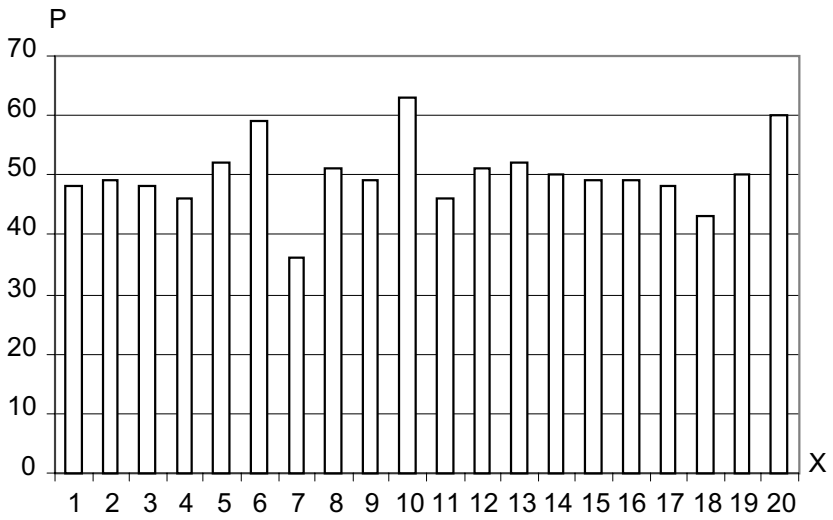
$$Y - m_y = \rho \cdot \sqrt{\frac{D_y}{D_x}} \cdot (X - m_x) + \xi, \quad (14)$$

который при известных (выборочных) σ , m_x , m_y , D_x , D_y определяет связь между Y и X с точностью до ξ , где ξ распределена по нормальному закону с нулевым средним и дисперсией $(1 - \sigma^2)D_y$. Для нормальных распределений X и Y эта оценка оптимальна, для других типов распределений такое представление можно использовать как условно оптимальное. Трудности при моделировании по (14) при распределениях, отличных от нормального, можно рассмотреть на примере равномерного распределения величин X и Y . Для упрощения (что не нарушает общности) будем считать, что $m_x = m_y = 0$. Моделирование величины Y по X ведется в соответствии с (14) по выражению

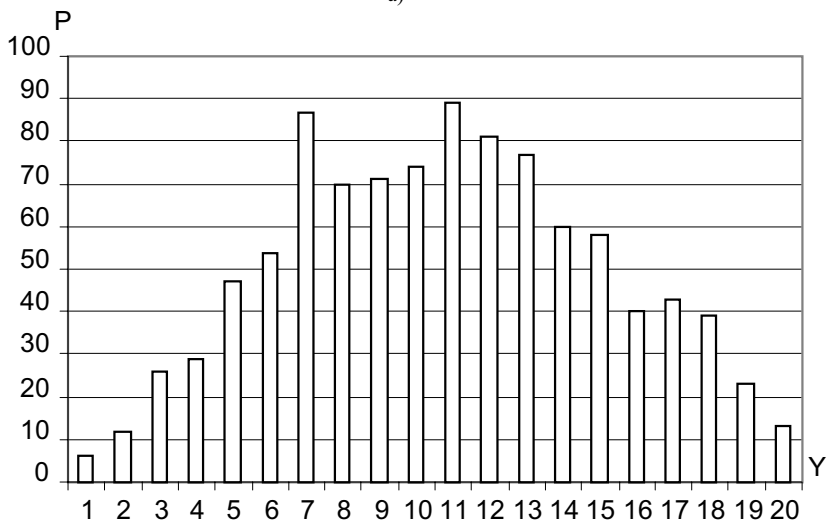
$$Y = k \cdot X + \xi_p, \quad (15)$$

где X и ξ_p распределены по равномерному закону. Выражение (15) определяет Y как сумму двух равномерно распределенных величин. Закон распределения Y в этом случае становится треугольным и дисперсия D_y может отличаться от заданной. Гистограммы распределений для X и Y приведены на рис. 9, а и б соответственно.

Достоинство метода моделирования - возможность генерации на каждом шаге моделирования, т.е. встраивание в соответствующие программы.



а)



б)

Рис. 9. Гистограммы распределений величин X (а) и Y (б) при числе испытаний 1000

При статистических испытаниях часто равномерное распределение используется как обеспечивающее максимальную степень неопределенности. В этом случае для получения близкого к равномерному закону распределения Y необходимо найти распределение для ξ . Данная задача является разновидностью вариационной с ограничениями вида

$$\left(\int_{y_{\min}}^{y_{\max}} f(x) dx = I; g(y) = \frac{I}{y_{\max} - y_{\min}} \right).$$

Второй способ моделирования близок к рассмотренному и также сводится к оптимизационной задаче. Для моделирования берутся две случайные некоррелированные последовательности размерностью n с равномерным распределением. Одна из последовательностей фиксируется (сохраняет начальную упорядоченность), а во второй производится перестановки. После каждой перестановки вычисляется неравенство (целевая функция)

$$\frac{\sum_{i=1}^n X_i \cdot Y_i}{\sqrt{D_x \cdot D_x}} - \rho_{зад} \leq \Delta,$$

которая определяет достижение заданной точности между заданным $\rho_{зад}$ и фактическими (для текущих последовательностей X и Y) коэффициентами корреляции. Очевидно, что решения для заданных последовательностей может и не существовать. При достаточном больших n и разумных Δ решение находится достаточно устойчиво. Можно ввести правила для осуществления перестановок, существенно ускоряющие решение. Закон распределения величин X и Y соответствует рис. 9, а, а пространство точек (x, y) представлено на рис. 10. Достоинство метода – сохранение заданных параметров (законов распределения и дисперсий). Недостаток – работа с заранее сгенерированными последовательностями.

Следующий метод связан с использованием автокорреляционной функции. Если взять две последовательности $X=Y$ и подсчитать коэффициент корреляции при сдвиге индексов от 0 до n (при этом целесообразно Y представить замкнутой последовательностью, например перестановкой $Y = \{x_{n/2+1}, \dots, x_n, x_1, \dots, x_{n/2}, x_1, \dots, x_{n/2}, x_{n/2+1}, \dots, x_n\}$, и удвоить длину $X\{x_1, \dots, x_n, x_1, \dots, x_n\}$), то получим автокорреляционную функцию, которая достаточно близка к линейной (рис. 11).

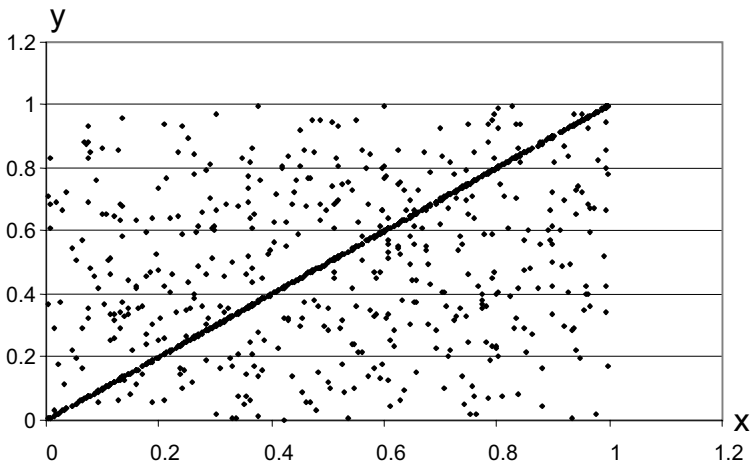


Рис. 10. Область существования случайных точек для второго и третьего методов моделирования (для автокорреляционной функции взята точка $K_{xy} = 0,600422$ и $M_x = 0,514811$, $M_y = 0,50676$, $D_x = 0,078096$, $D_y = 0,074124$)

По полученной зависимости определяется сдвиг, обеспечивающий значение $K_{xy} = K_{xy \text{ зад}}$. Из Y «вырезается» с указанным сдвигом n элементов. Как и в предыдущем случае, характер распределений и их параметры не изменяются. Недостаток аналогичный – последовательности должны быть получены заранее.

Еще один подход к моделированию связан с изменением пространства существования случайных точек с координатами x, y . Для обоснования этого подхода используется *векторное представление случайных величин* X, Y . Если рассматривать n -мерные векторы X, Y , то выборочное значение коэффициента корреляции, умноженное на $n-1$, есть скалярное произведение этих векторов. Тогда точки x и y в пространстве $R(n)$ лежат на n -мерной сфере радиуса $n-1$. Задание скалярного произведения равносильно заданию угла. Следовательно, значение y можно выбрать на гиперокружности с центром x , лежащей на сфере $S(n)$, радиус которой вычисляется по $\rho_{\text{зад}}$. Указанный подход может быть упрощенно реализован в пространстве x, y . При равномерном распределении ($0 \leq x \leq 1$, $0 \leq y \leq 1$) область существования случайных точек представляет квадрат (рис. 12, а).

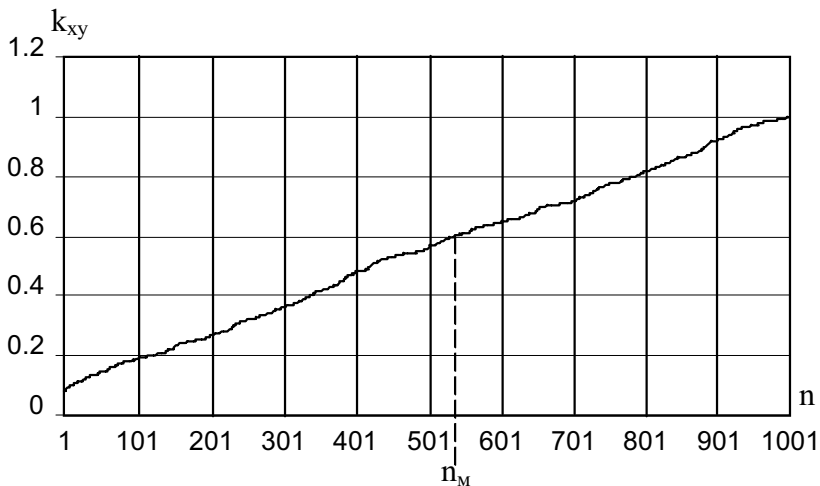


Рис. 11. Автокорреляционная функция, где n величина сдвига в исходной числовой последовательности ($n = n_M$ для примера рис. 10)

Если ввести ограничения на область существования точек:

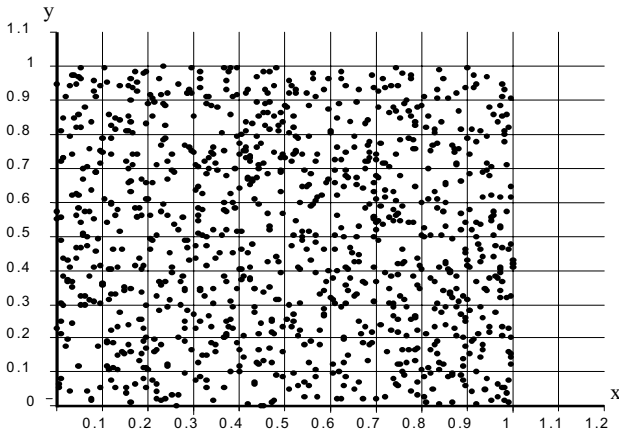
$$\left. \begin{array}{l} y \leq x + b \\ y \geq x - b \end{array} \right\} \quad (16)$$

то для новой области коэффициент корреляции будет зависеть от параметра b (рис. 12, б). Этот метод также обладает тем недостатком, что закон распределения Y не соответствует равномерному, но значительно ближе к нему (рис. 13), чем при моделировании по (14).

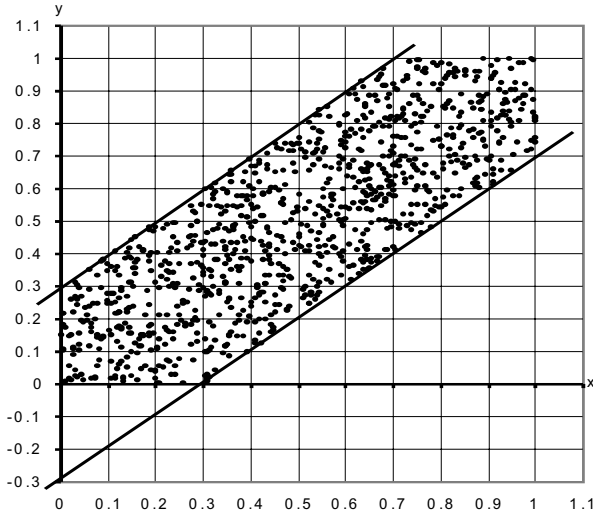
Таким образом, рассмотрены четыре способа генерации коррелированных случайных величин:

1. С использованием линейного предиктора. Недостаток – закон распределения Y не соответствует заданному и требует подгонки последовательными итерациями.
2. Метод перестановок. Недостаток – заранее сгенерированная последовательность. Закон распределения Y соответствует заданному.
3. Метод с использованием автокорреляционной функции. По свойствам полностью аналогичен методу 2.
4. Метод ограничения пространства существования X и Y . Искажает закон распределения Y , но позволяет генерировать последовательность в

тепе вычислений и, следовательно, может быть встроен в циклические программы статистического моделирования.



а)



б)

Рис. 12. Область существования некоррелированных (а) и коррелированных (б) точек ($b = 0,3$, $\rho_{xy} = 0,838$)

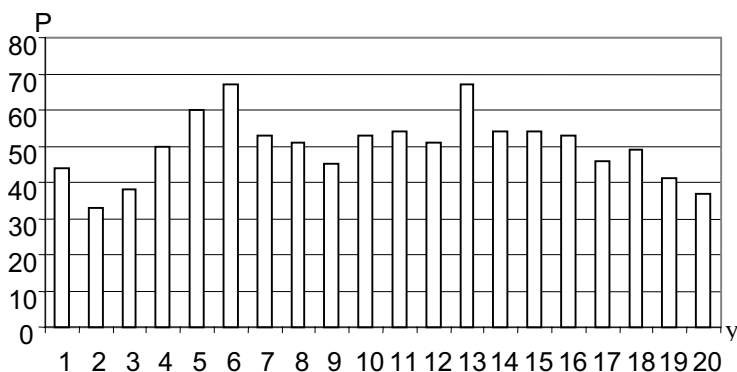


Рис. 13. Гистограмма распределения величины y по выражению (16)

Библиографический список

1. **Вентцель А. Д.** Курс теории случайных процессов. — М.: Наука, 1976.
2. **Ивченко Г. И., Медведев Ю. И.** Математическая статистика: Учеб. пособие для вузов. — М.: Высш. шк., 1984

УДК 621.311.22

Требования к представлению цифровой информации в современных микропроцессорных защитах и фиксирующих приборах

А.М. Чухин, канд. техн. наук

Большинство микропроцессорных защит (терминалов) и близких к ним по входным цепям микропроцессорных фиксирующих приборов (МФП) используют аналого-цифровое преобразование (АЦП) с 12-24 отсчетами на период промышленной частоты. Разрядность АЦП лежит в диапазоне 10-14. Такие характеристики АЦП обеспечивают достаточно хорошее цифровое представление сигналов при отсутствии существенных погрешностей и помех во входных сигналах. На практике могут

иметь место случаи, когда входные сигналы имеют погрешность, значительно превышающую расчетную. При КЗ на ЛЭП вблизи шин электростанций в токе может появляться аperiodическая составляющая с достаточно большой постоянной времени. При этом трансформаторы тока (ТТ) могут иметь значительную погрешность, обусловленную насыщением. В микропроцессорных фиксирующих приборах (МФП) для определения расстояния до места короткого замыкания (ОМКЗ) насыщение ТТ может быть весьма значительным, т.к. приборы часто включаются на измерительный сердечник ТТ. Большинство микропроцессорных защит и МФП используют в качестве фильтров ортогональное разложение (разложение Фурье по первой гармонике).

При насыщении ТТ погрешность цифрового представления тока может существенно повлиять на устройства, реагирующие на комплексные сопротивления при КЗ. К таким устройствам в первую очередь относятся дистанционные защиты и МФП для ОМКЗ. Поскольку развитие технических средств для измерения (прежде всего АЦП и микропроцессоров) происходит весьма быстро, целесообразно рассмотреть определение характеристик АЦП для целей более сложной обработки сигналов. Цель – возможное уменьшение погрешности представления тока при насыщении ТТ. В [1] рассмотрен вопрос о восстановлении тока насыщенного трансформатора тока в стационарном режиме без учета вебер-амперной характеристики ТТ. Как было отмечено выше, при близких КЗ могут возникать условия, когда защиты и МФП должны работать в условиях переходного процесса. Ниже рассматривается возможность восстановления тока при насыщении ТТ в условиях нестационарного (переходного) процесса и соответствующие требования к АЦП и микропроцессору.

Рассматриваются два случая насыщения ТТ. В первом насыщение обусловлено наличием аperiodической составляющей, которая приводит к насыщению ТТ только в отрицательный (положительный) полупериод, как это показано на осциллограмме рис. 1. Во втором случае насыщение ТТ обусловлено как аperiodической, так и периодической составляющей (рис. 2).

В первом случае имеются значительные участки точного перемагничивания (ТП) ТТ. Ниже предполагается, что постоянная времени аperiodической составляющей больше 10 мс. При меньших постоянных времени они быстро затухают и процесс становится стационарным. Можно отметить, что быстродействующие ступени МП защит обычно имеют время срабатывания не менее 40 мс.

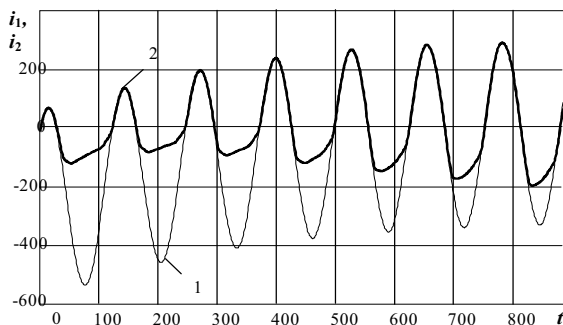


Рис. 1. Осциллограммы первичного (1) и вторичного (2) токов модели ТТ при насыщении только в отрицательные полупериоды

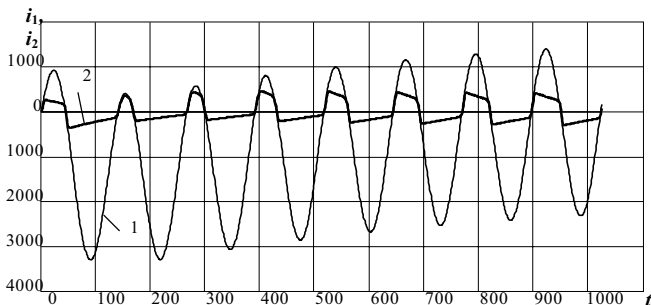


Рис. 2. Осциллограммы первичного (1) и вторичного (2) токов модели ТТ при насыщении каждого полупериода

Для сигнала рис. 1 восстановление на каждом неискаженном участке осуществляется по выражению

$$U(t) = U_0 + U_m \sin(\omega t + \varphi). \quad (1)$$

Сначала определяются нулевые значения $U(t)$, соответствующие точкам t_0 и t_1 на рис. 3.

Для моментов времени t_0 и t_1 по выражению (1) можно записать:

$$\left. \begin{aligned} U(t_0) &= U_0 + U_m \cdot \sin(\omega t_0 + \varphi) = 0; \\ U(t_1) &= U_0 + U_m \cdot \sin(\omega t_0 + \omega \Delta t_0 + \varphi) = 0; \\ t_1 &= t_0 + \Delta t. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

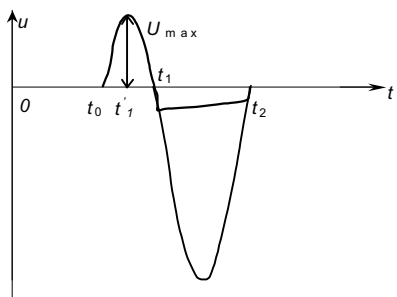


Рис. 3. Фрагмент осциллограммы, иллюстрирующий восстановление вторичного тока по участку ТП положительной полуволны

Система (2) может быть преобразована введением обозначений $\omega t_0 + \varphi = \alpha$; $\omega \Delta t_0 = \beta$:

$$\left. \begin{aligned} U(t_0) &= U_0 + U_m \cdot \sin(\alpha) = 0; \\ U(t_1) &= U_0 + U_m \cdot \sin(\alpha + \beta) = 0. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Вычитая из первого уравнения (3) второе и преобразовывая $\sin(\alpha + \beta)$, получим

$$U_m \sin \alpha - U_m \sin \alpha \cos \beta - U_m \cos \alpha \sin \beta = 0. \quad (4)$$

Если за точку отсчета принять $t_0 = 0$, то (4) имеет одно тривиальное решение при $\beta = \pi/2$ ($\Delta t = 5$ мс):

$$U_m \sin \varphi - U_m \cos \varphi = 0 \text{ и } \varphi = \pi/4. \quad (5)$$

При $\cos \beta \neq 0$ можно поделить (4) на $\cos \beta$:

$$U_m \sin \alpha \left(\frac{1 - \cos \beta}{\cos \beta} \right) - U_m \cos \alpha \cdot \text{tg} \beta = 0. \quad (6)$$

Так как β известно, то (6) можно представить следующим образом:

$$A \sin \alpha - B \cos \alpha = 0, \quad (7)$$

где $A = (1 - \cos \beta) \cos \beta$; $B = \text{tg} \beta$.

Выражение (7) содержит одну неизвестную α . Так как $\alpha = 0$ только в случае отсутствия апериодической, что легко определить по $\Delta t = 10$ мс, то в общем случае

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{B}{A} \quad \text{и} \quad \alpha = \operatorname{arctg} \frac{B}{A}. \quad (8)$$

При известных α и β по одному из уравнений (3) и еще одному уравнению (9) определяются U_0 и U_m .

$$U_{\max} = U_0 + U_m \sin(\omega \cdot t), \quad (9)$$

где $t = \frac{t_1 - t_0}{2}$.

Полученное решение должно быть проверено по нескольким промежуточным точкам в интервале $t_0 \div t_1$. Если расчетные и замеренные АЦП значения совпадают с заданной точностью, то задача на интервале $t_0 \div t_1$ решена. Далее можно распространить решение на интервал $t_1 \div t_2$. Последнее справедливо только в случае, если $t_2 - t_0 \approx 20$ мс, что соответствует неизменной постоянной составляющей. Если это условие не выполняется, решение по (8) и (3) повторяется для точек $t_1 \div t_2$, но оно уже не может быть дополнено третьим уравнением аналогично интервалу $t_0 \div t_1$, где ток был не искажен. Ниже будет показано, что в этом случае решение для U_0, U_m может быть получено только на интервале точного перематгничивания $t_{\min} \div t_{\max}$ (рис. 4).

Поиск дополнительного уравнения для второго случая, когда оба полупериода соответствуют насыщению ТТ, осуществляется по алгоритму, близкому к восстановлению в стационарном режиме по каждому полупериоду [1]. Восстановление в этом случае иллюстрируется рис. 4. Для восстановления используется полупериод осциллограммы рис. 2, выделенный рамкой.

Аналогично предыдущему случаю по системе (3) для точек t_0 и t_1 определяется угол α (или φ). На интервале от t_0 ($U(t_0) = 0$) до t'_1 ($U(t'_1) = U_{\max}$) отсчеты АЦП используются для получения аппроксимирующего полинома третьей степени $u(t) = a_3 \cdot t^3 + a_2 \cdot t^2 + a_1 \cdot t + a_0$.

Целесообразная степень аппроксимирующего полинома определена многократным моделированием погрешностей ТТ при насыщении в диапазоне $5 \div 70$ % для различных типов сталей.

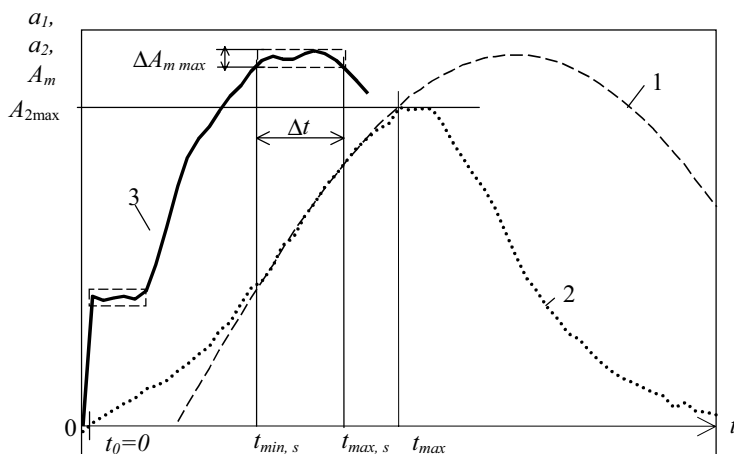


Рис. 4. Фрагмент осциллограммы первичного (1), вторичного (2) токов и производная амплитуды синусоидального тока (3), подсчитанная по мгновенным значениям вторичного тока

Минимально необходимое число точек для определения a_0, a_1, a_2, a_3 , должно быть равно 4. С учетом шумов АЦП практически желательно иметь не менее 6 точек. Это количество точек и определяет интервал дискретизации (число отсчетов на период). Если предположить, что при погрешности ТТ приблизительно 50 %, интервал $t_{\min s} + t_{\max s}$ составляет около 40 градусов (определяется характеристикой стали сердечника), то число отсчетов на период составит $6 \cdot 360^\circ / 40^\circ = 54$. Округляя это значение до ближайшего большего стандартного [2], получаем 64 отсчета на период.

Аппроксимирующий полином используется для построения зависимости (3) на рис. 4 $Am(t)$. Эта зависимость вычисляется следующим образом:

- определяются значения $A_{2\max}$ и t_{\max} (рис. 4);
- по трем точкам, лежащим слева от t_{\max} , определяется $Am(t)$ по уравнениям (3), (8) и дополнительному уравнению (9) для одной из трех выбранных точек. Желательна проверка (усреднение) по всем трем точкам;
- осуществляется рекурсивный сдвиг на одну точку влево, и выполняются все вычисления предыдущего пункта; процедура повторяется до $t_0 = 0$;

• определяется максимальное значение амплитуды по зависимости (3) (рис. 4). Вычисляется разница $\Delta Am(t)$, которая определяет интервал точного перемагничивания $t_{\min} + t_{\max}$. Значение ΔAm_{\max} выбирается таким образом, чтобы число точек (отсчетов АЦП) в указанном диапазоне было не меньше определенного ранее (4+6). При минимальном количестве точек и используется аппроксимирующий полином, по которому в указанном диапазоне может быть вычислено любое количество точек (псевдоотсчеты АЦП).

Разрядность АЦП приближенно может быть определена по следующей системе:

- условие передачи неискаженного максимума с учетом полярности - $2U_{\max} = 2^N$; (10)
- условие 2+3 % погрешности при номинальном значении величины - $2U_{\text{ном}} = 2^8$;
- расчетная кратность сигнала - $\frac{U_{\max}}{U_{\text{ном}}} = 26$.

Решение системы (10) дает значение $N = 15$. Допустимым можно считать $N = 14$.

Полученные параметры АЦП позволяют по известным алгоритмам обработки информации микропроцессорной защитой определить требования к процессору. Очевидно, что для МФП требования к процессору будут менее жесткие, т.к. в этом случае его задача в темпе процесса только собрать информацию. Обработка может вестись после регистрации данных. Обычно к обработке информации (решение ОМКЗ) предъявляется требование $t_{\text{обр}} \leq 1\text{с}$. Это диктуется необходимостью повторного функционирования МФП в цикле неуспешного АПВ. Однако можно это требование ослабить, если предусмотреть регистрацию как задачу с наивысшим приоритетом (по отношению к ОМКЗ).

Выводы

1. С учетом реальных сигналов (прежде всего от ТТ) микропроцессорные устройства защиты, автоматики и МФП должны иметь АЦП с дискретизацией по времени не менее 64 отсчетов на период и 14-разрядного квантования по уровню.

2. Процессорная часть защит требует весьма сложных вычислений для восстановления сигнала в темпе процесса.

3. Рассмотренные алгоритмы инвариантны к конкретным характеристикам ТТ и могут реализовываться в микропроцессорных защитах общего назначения без всяких дополнительных настроек и характеристик.

Библиографический список

1. **Марков М.Г., Мыльников В.А., Чухин А.М.** Восстановление формы кривой тока для уменьшения погрешности определения места повреждения на ЛЭП / Сб. ст. к VIII Междунар. конф. «Информационная среда вуза». – Иваново, ИГАСА, 4-5 октября 2001. – С. 165-168.

16. **Аржаников Е.А., Мыльников В.А., Чухин А.М.** Алгоритм уменьшения полной погрешности трансформаторов тока для определения места КЗ на ЛЭП // Вестник ИГЭУ. – 2002. – № 1. – С. 115-119.

2. **Общие** технические требования к микропроцессорным устройствам защиты и автоматике энергосистем. РД 34.35.310-97 / Служба передового опыта ОРГРЭС. – М., 1997. – 36 с.

УДК 621.311.22

Информационное обеспечение решения задачи определения места короткого замыкания на линиях сложной конфигурации

С.А. Полушин, асп., А.М. Чухин, канд. техн. наук

В настоящее время на ЛЭП с $U \geq 110$ кВ широко применяются приборы для одностороннего определения места КЗ (ОМКЗ). Общее количество таких приборов достигает нескольких тысяч. Кроме того, на многих объектах в состав программного обеспечения цифровых осциллографов (ЦО) входят программы, реализующие функции ОМКЗ. Как приборы, так и ЦО используют для решения задачи большие объемы информации. Вся информация может быть условно разделена на следующие части:

- 1) информация об аварийных токах и напряжениях, зарегистрированных при КЗ;
- 2) настройки, используемые для решения задачи;
- 3) результаты решения задачи.

В большинстве систем ОМКЗ информация первых двух типов «жестко» привязана к конкретному объекту. Это позволяет полностью авто-

матризовать расчет (в приборах ОМКЗ) и ограничиться минимальным вмешательством персонала при расчетах с использованием информации ЦО. По этой причине информация третьего типа (результат) «жестко» соответствует информации типов 1, 2.

Часто информации достаточно для проведения ретроспективных расчетов разными методами или при различных конфигурациях и параметрах ЛЭП. Это позволяет по уже определенному при обходе расстоянию до места КЗ уточнить параметры линии (информация типа 2) и выявить факторы, которые существенно влияют на точность расчета задачи ОМКЗ. Полезны также расчеты и для определения методической погрешности решения задачи ОМКЗ конкретной линии в целях выбора способа решения задачи или оценки результатов используемого алгоритма. Базы данных (БД), в которых хранится информация типа 2, многократно изменять нецелесообразно (и даже вредно), т.к. они используются для получения результатов в темпе процесса, т.е. быстрого решения задачи ОМКЗ. По этой причине для вариантных расчетов используются специализированные БД, предназначенные для многократного редактирования.

Информация типа 1 также должна быть доступна для ретроспективных расчетов. При ее извлечении возникают трудности, связанные с тем, что она доступна для просмотра (из своих БД), но часто недоступна в форме файла, пригодного для ретроспективных расчетов. Это связано с отсутствием экспорта данных из «своих БД».

Для решения задач, связанных с подготовкой информации для ретроспективного решения задачи ОМКЗ, был разработан комплекс программ, позволяющий иметь информацию типов 1, 2 в требуемом объеме и формате. Решение задачи должно удовлетворять следующим требованиям:

- информация о настройке и конфигурации должна сохраняться при многократных расчетах и «связываться» с информацией типа 3;
- должно быть обеспечено простое редактирование каждого поля данных, без изменения остальных;
- данные об аварийных значениях токов и напряжений должны «экспортироваться» из любых специализированных систем как в форме чисел, так и в форме осциллограмм;
- должна быть предусмотрена возможность «экспорта» из файлов типа COMTRADE, принятых в качестве стандарта для ЦО;
- любые данные должны быть доступны для просмотра;
- все данные должны иметь возможность передачи к программам обработки в заданных форматах.

Реализация поставленных требований потребовала разработки комплекса программ. Для ведения БД по параметрам ЛЭП была разработана программа, соответствующая наиболее подробному описанию линии, используемому в настоящее время. В этой же БД возможен ввод информации о токах и напряжениях аварийного режима, полученных при проведении расчетов с использованием программ расчета токов короткого замыкания. Для извлечения данных из систем сбора информации от приборов ОМКЗ [1] были разработаны специальные программы экспорта данных по любой аварии.

Для цифровых осциллографов, осуществляющих экспорт в формате COMTRADE, разработана программа, позволяющая экспортировать данные по заранее определенному списку, который может быть сохранен и использован многократно для любой ЛЭП, входящей в поле регистрации ЦО.

Реализация такой системы, в отличие от «стандартных» БД приборов ОМКЗ или ЦО, позволяет не только просматривать результаты, но и производить многократные расчеты как по реальным, так и по расчетным данным. Такой подход позволяет реализовать и быстрые изменения как алгоритма расчета, так и условий (настроек) при заданном алгоритме.

На рис.1, 2, 3 приведены рабочие экраны для информации первого и второго типа, соответствующие поставленным требованиям. В качестве исходных данных использовались данные системы «START» и данные осциллографирования от прибора типа ИМФ-3Р (разработки фирмы "РАДИУС"). Аналогично могут быть просмотрены (экспортированы) данные второго, третьего типа от приборов первого поколения (ИМФ, ФПМ, МИР, ИМФ-3С).

Опыт эксплуатации такого типа систем для приборов ОМКЗ первого поколения показал высокую заинтересованность эксплуатационного персонала в таких системах. Основное использование в условиях эксплуатации связано с анализом возможных результатов решения для конкретных ЛЭП и возможностью перерасчета в сложных случаях, когда автоматическое решение вызывает сомнение.

При исследовании алгоритмов возможно использование «реальных» данных от большого количества источников информации: приборов ОМКЗ, ЦО, микропроцессорных терминалов с функцией осциллографирования.

Информационное обеспечение решения задачи определения места короткого замыкания на линиях сложной конфигурации

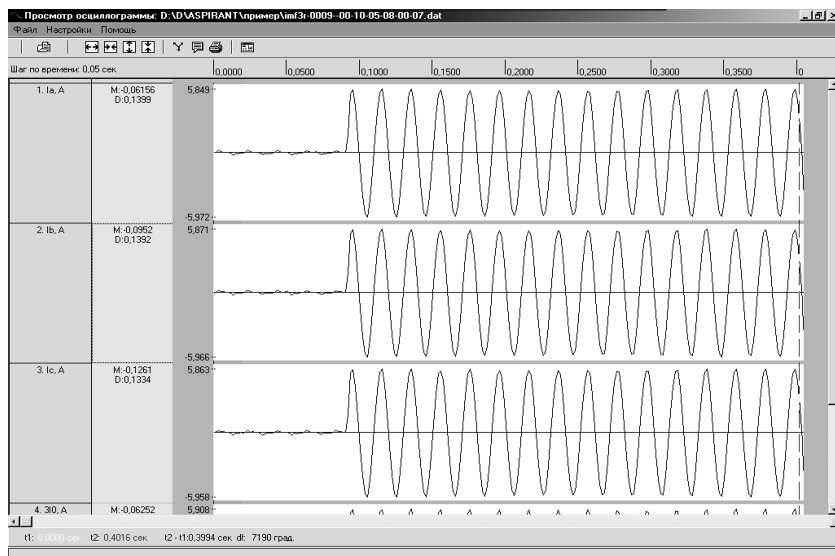


Рис. 1. Окно просмотра осциллограмм прибора ИМФ-3Р

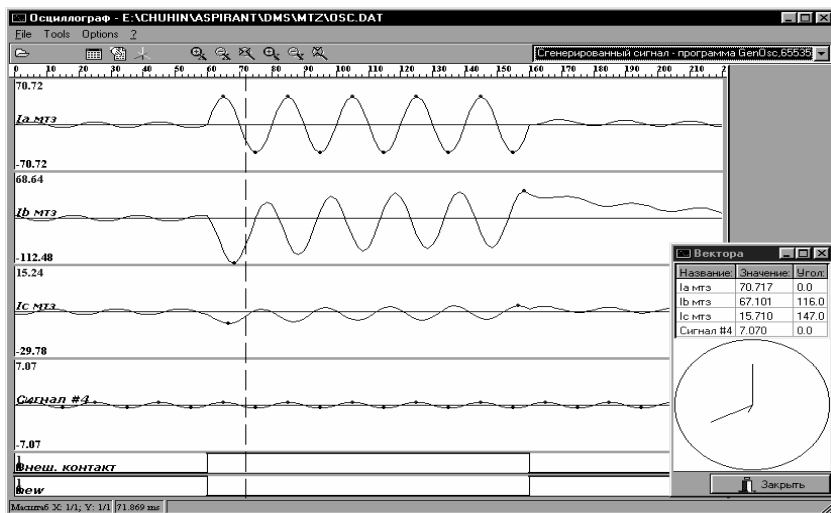


Рис. 2. Окно просмотра универсальной программы для формата COMTRADE

Моделирование аналоговых и цифровых реле тока с учетом насыщения трансформатора тока

Номер уч	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Длина уч	12.3	20.5	6.0	15.2	10.5	0.0	40.0	40.0	40.0
R1уд	0.210	0.210	0.210	0.210	0.210	0.210	0.210	0.210	0.210
X1уд	0.683	0.683	0.683	0.683	0.683	0.3	0.8	0.8	0.8
R0уд	0.345	0.345	0.345	0.345	0.345	0.5	0.9	0.9	0.9
X0уд	1.304	1.304	1.304	1.304	1.304	1.9	1.5	1.5	1.5
Xмуд	0.905	0.905	0.905	0.0	0.905	0.9	0.7	0.7	0.7
Xотв	30.6	0.0	0.0	50.6	0.0	0.0	0.8	0.0	0.0
Xмотв	0.0	39.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0
Угол В	-2	-1.5	-1	-0.5	0	1	2	3.5	5

Рис.3. Рабочее окно «внешней» базы данных параметров ЛЭП для ОМКЗ

УДК 621.311.22

Моделирование аналоговых и цифровых реле тока с учетом насыщения трансформатора тока

К.К. Колягин, асп., М.Г. Марков, А.М. Чухин, кандидаты техн. наук

При модернизации электроэнергетических объектов электромеханические устройства релейной защиты (УРЗ) все чаще заменяются микропроцессорными. Модернизации, как правило, подвергаются отдельные элементы. Это приводит к необходимости согласования УРЗ, выполненных на различных принципах. Отличие обусловлено способом обработки информации в электромеханических и микропроцессорных УРЗ. Большинство электромеханических устройств защиты с одной подведенной величиной (реле тока, напряжения) реагирует на действующее значение тока в обмотке. Точнее, эти реле реагируют на квадрат действующего значения тока, т. к. условием срабатывания является превышение элек-

ромагнитным моментом противодействующего момента. Микропроцессорные УРЗ в качестве условия срабатывания используют неравенство $I > I_{cp}$, которое должно выполняться определенное время (интегральное неравенство). Для решения этого неравенства определяется интегральное значение тока [1]. Ставший весьма распространенным термин “интегральный” может относиться, например, к среднему (по модулю), действующему или амплитудному значениям тока (или напряжения). Это означает, что “интегральное” значение вычисляется на определенном интервале времени. Как правило, это время составляет половину или период (10 или 20 мс) промышленной частоты. Если среднее или действующее значения являются интегральными по определению (1), (2), то амплитудное значение может быть как интегральным, так и близким к точечной оценке.

$$I_{cp} = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} |Im \cdot \sin(\omega t + \varphi)| dt, \quad (1)$$

$$I_{\theta} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (Im \cdot \sin(\omega t + \varphi))^2 dt}. \quad (2)$$

Так амплитудное значение может быть определено по максимальному (минимальному) значению, полученному в результате аналого-цифрового преобразования. Эта оценка точечная. Можно определить амплитуду по любым двум мгновенным значениям, расположенным на известном интервале $\Delta t = t_2 - t_1$ ($t_2 > t_1$). Часто принимают $\Delta t = 5$ мс ($\varphi = \omega \Delta t = 90^\circ$).

$$i_{t_1} = Im \cdot \sin(\omega t_1 + \varphi); \quad (3)$$

$$i_{t_2} = Im \cdot \sin(\omega t_1 + \varphi + 90^\circ) = Im \cdot \cos(\omega t_1 + \varphi), \quad (4)$$

тогда

$$\sqrt{i_{t_1}^2 + i_{t_2}^2} = \sqrt{Im^2 \cdot \sin^2(\omega t_1 + \varphi) + Im^2 \cdot \cos^2(\omega t_1 + \varphi)} = Im. \quad (5)$$

Эта оценка близка к точечной.

Возможно интегрирование выделением составляющей промышленной частоты с помощью коэффициентов Фурье по первой гармонике:

$$I_c = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} i(t) \cdot \cos(\omega t) dt; \quad (6)$$

$$I_s = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} i(t) \cdot \sin(\omega t) dt, \quad (7)$$

если $i(t) = Im \cdot \sin(\omega t + \varphi)$, то

$$Im = \sqrt{i_c^2 + i_s^2}, \quad (8)$$

$$\varphi = \arctg \frac{i_s}{i_c}. \quad (9)$$

Оценки по (8), (9) являются интегральными для амплитуды и угла.

Для синусоидального (т. е. неизменного) сигнала безразлично, какое значение вычисляется, т. к. все они связаны постоянными коэффициентами:

$$I_{cp} = \frac{2}{\pi} Im, \quad (10)$$

$$I_{\delta} = \frac{Im}{\sqrt{2}}. \quad (11)$$

На практике для УРЗ численные значения даются в размерности действующих вне зависимости от того, что измеряется. Так большинство стрелочных комбинированных приборов (тестеров) измеряют среднее значение тока и напряжения (хотя шкала градуирована в действующих значениях). Щитовые электромагнитные приборы измеряют действующее значение, цифровые могут реагировать на любое значение, но шкала во всех случаях масштабируется по действующему значению. В этом смысле цифровые приборы (как и микропроцессорные УРЗ и электромеханические приборы различных систем) могут при несинусоидальных измеряемых величинах давать различные показания. Для практических целей представляет интерес функционирование УРЗ, выполненных на электромеханических реле и микропроцессорных системах (терминалах). Такой интерес возникает по следующим причинам:

- для большинства микропроцессорных защит неизвестно, на какое значение фактически они реагируют. Естественно, что уставки даются в действующих значениях;
- на многих российских объектах трансформаторы тока (ТТ) могут иметь значительные погрешности, которые выходят за рамки оговоренных (10 %);

- возможны случаи, когда две защиты, выполненные на различных принципах (электромеханическом и цифровом), должны быть согласованы между собой (существующие методики в этом случае предполагают использование электромеханических реле);
- все расчеты для выбора уставок реле ведутся в действующих значениях установившегося (стационарного) процесса, а влияние переходных процессов учитывается постоянными коэффициентами, определенными для электромеханических реле.

Решение поставленной задачи проводится с использованием математических моделей электромеханического реле тока и цифровых реле, использующих интегральную оценку действующего, среднего и амплитудного значений тока.

Для решения поставленных вопросов был разработан программный комплекс, включающий:

1. Модель электромагнитного реле РТ-40.
2. Модель обобщенного микропроцессорного реле тока или токовой защиты с произвольной (задаваемой пользователем) характеристикой $t_{cp}=f(I)$.
3. Генератор осциллограмм в формате COMTRADE.
4. Модель трансформатора тока, использующую в качестве входной информации осциллограмму в формате COMTRADE.

Программный комплекс позволяет рассмотреть функционирование УРЗ в различных условиях. При наличии конкретной информации возможно решение практических задач. Так если обобщенную модель токовой микропроцессорной защиты настроить в соответствии с конкретным терминалом, подключить к реальному трансформатору тока (т.е. задать программную модель конкретного трансформатора тока), то с использованием программы ТКЗ и генератора осциллограмм можно оценить функционирование защиты при переходных процессах (получаются при генерации осциллограмм). При этом учитывается насыщение ТТ при заданной форме и кратности первичного тока. Задается не только вынужденная, но и свободная составляющая. Возможно решение вопроса о согласовании электромеханических и микропроцессорных защит. При замене типов защит можно рассмотреть аналогичные вопросы для них. Ниже в качестве примера будут рассмотрены токовые защиты. Далее рассматриваются отдельные программные блоки (модели).

Модель электромеханического реле тока РТ-40 разработана с использованием данных [2, 3] и проверена на адекватность физическими экспериментами. Функционирование реле РТ-40 описывается нелинейным дифференциальным уравнением второго порядка:

$$J \frac{d^2\alpha}{dt^2} + p \frac{d\alpha}{dt} + M_{np}(\alpha) = M_{эл}(i), \quad (12)$$

где α - угол поворота якоря; J - момент инерции якоря; p - коэффициент, учитывающий вязкое трение, сопротивление воздуха и наличие барабана с песком; $M_{np}(\alpha)$ - противодействующий момент (рис. 1, а); $M_{эл}(i)$ - электромагнитный момент (рис. 1, б).

При расчете электромагнитного момента учитывается насыщение сердечника реле по характеристике $K_i = f(i)$, где i – относительное (к уставке) значение тока (рис. 1, в). На коэффициент K_i умножается квадрат тока, что эквивалентно коррекции электромагнитного момента. Суммарная характеристика моментов приведена на рис. 1, г. Характеристики противодействующего и электромагнитного моментов приняты согласно [2, 3].

Контактная система реле может находиться в трех состояниях:

- 1) состоянии покоя, когда нормально замкнутый контакт замкнут, а нормально разомкнутый разомкнут;
- 2) состоянии, когда оба контакта разомкнуты;
- 3) состоянии, когда нормально замкнутый контакт разомкнут, а нормально разомкнутый замкнут.

Нелинейное дифференциальное уравнение решается методом Рунге-Кутты четвертого порядка.

Математические модели цифровых реле строятся значительно проще. Основная трудность связана с отсутствием достоверной информации о параметрах аналого-цифрового преобразования (число отчетов на период и разрядность АЦП) и интегрального параметра, на который реагирует реле. По этой причине ниже рассматривается несколько реле, реагирующих на среднее, амплитудное или действующее значение тока. Все интегральные параметры могут вычисляться на различных интервалах и с различным шагом (как правило, половина или период промышленной частоты). В математической модели принято, что интервал интегрирования составляет один период (кроме оговоренных случаев), а шаг решения составляет половину периода. Все цифровые реле на каждом шаге решают неравенство (13).

$$I_{\text{шт}} \geq I_{\text{уст}} \cdot \quad (13)$$

В отличие от электромеханических цифровые реле всегда имеют выдержку времени. Дискретность выдержки времени определяется шагом.

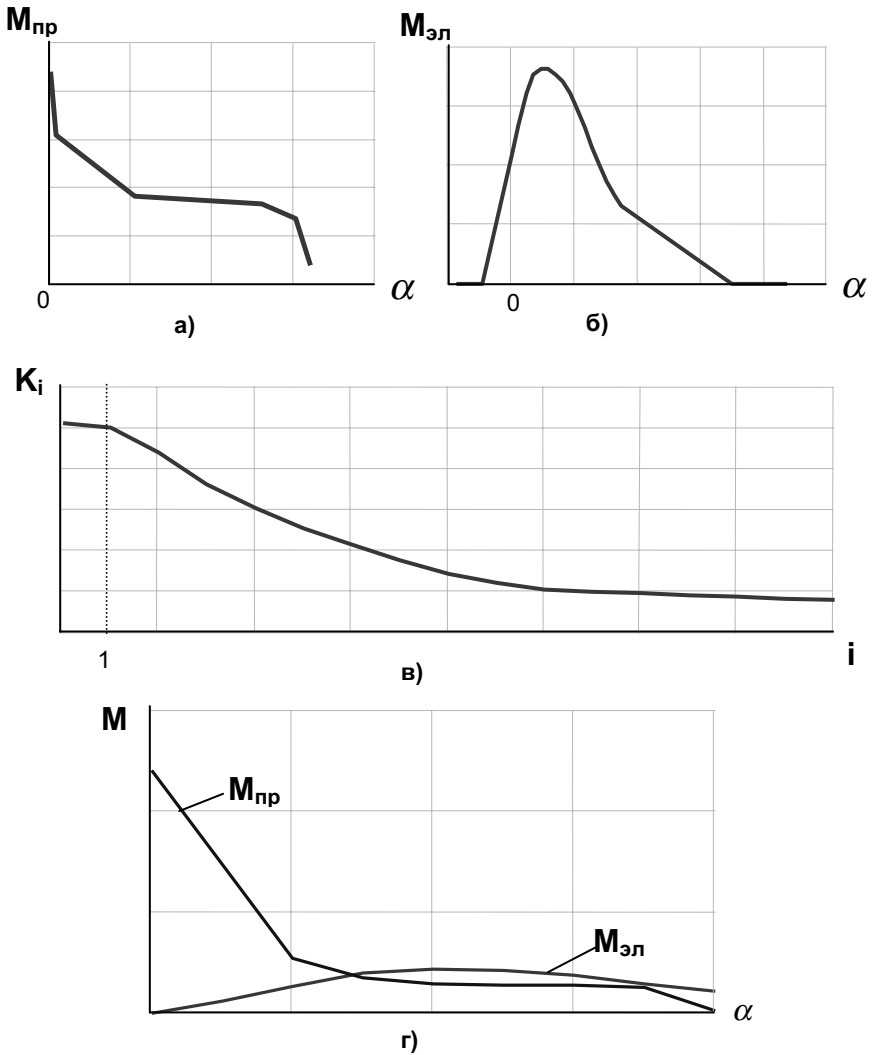


Рис. 1. Характеристики моментов реле РТ-40: а - момент сопротивления, обусловленный пружиной и контактными системами реле; б - тяговый электромагнитный момент; в - коэффициент, учитывающий изменение электромагнитного момента при насыщении сердечника; г - совмещенная характеристика тягового и противодействующего моментов

Далее везде принято, что дискретность выдержки времени равна 10 мс. Как правило, цифровые реле имеют минимальное время срабатывания 30-50 мс. Ниже принято, что все цифровые реле имеют время срабатывания и возврата 40 мс. Выдержка времени на срабатывание и возврат формируется с помощью счетчика, который подсчитывает, сколько раз подряд выполняется условие (13) или условие возврата (14).

$$I_{\text{штт}} < I_{\text{уст}} \cdot K_{\text{в}}, \quad (14)$$

где $K_{\text{в}}$ - коэффициент возврата (в модели принят 0,97).

Из описания цифровых реле невозможно определить их поведение, когда между условием возврата и новым срабатыванием интервал времени меньше времени возврата ("дребезг" реле). В математической модели принято, что при выполнении условия (14) хотя бы на одном шаге отсчет времени на срабатывание начинается заново. В реальных цифровых реле это может быть и не так. Процесс функционирования цифрового реле показан на рис. 2. Как видно из рис. 2, в общем случае шаг на возврат может быть не равен шагу на срабатывание. Ниже при моделировании принимается, что шаги на срабатывание и возврат равны 10 мс.

Как отмечалось выше, поведение реле при чисто синусоидальных токах анализируется достаточно просто. Поведение электромеханического реле при различных кратностях тока будет определяться данными [2, 3]. Поведение цифровых реле в этих условиях от кратности тока не зависит. На практике реле функционируют при несинусоидальных токах, обусловленных наличием свободных составляющих (как правило, экспоненциальных) и погрешностей трансформаторов тока (ТТ).

Для моделирования этих условий используется генератор осциллограмм, который автоматически вычисляет свободную составляющую первичного тока по угловому сдвигу между предшествующим режимом и режимом КЗ. Для моделирования вторичных токов разработана модель ТТ. Схема замещения ТТ приведена на рис. 3. В схеме индуктивность L_{30} нелинейна, поэтому напряжение можно оценивать только по производной потокосцепления. Уравнения, записанные для схемы рис. 3 по закону Ома и законам Кирхгофа, имеют вид

$$\left. \begin{aligned} i_{10} &= i_{3R} + i_{3L} + i_{20}; \\ i_{20} \cdot R_{20} + L_{20} \cdot \frac{di_{20}}{dt} - \frac{d\psi}{dt} &= 0; \\ \frac{d\psi}{dt} - i_{3R} \cdot R_{30} &= 0; \\ i_{3L} &= f(\psi). \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

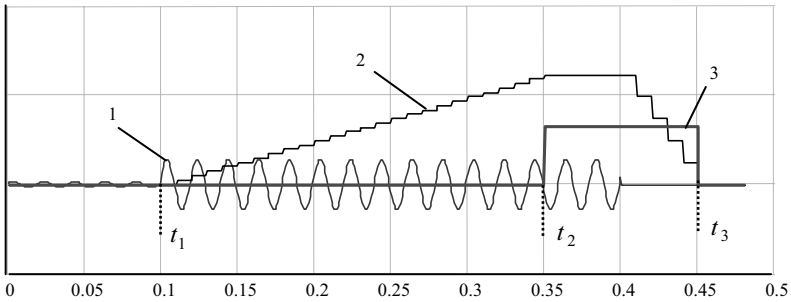


Рис. 2. Иллюстрация к условиям срабатывания и возврата цифрового реле:
1 - осциллограмма тока; 2 – счетчик на срабатывание и возврат; 3 – состояние контакта реле; t_1 - момент, соответствующий началу короткого замыкания; t_2 - момент, соответствующий срабатыванию реле; t_3 - момент, соответствующий возврату реле

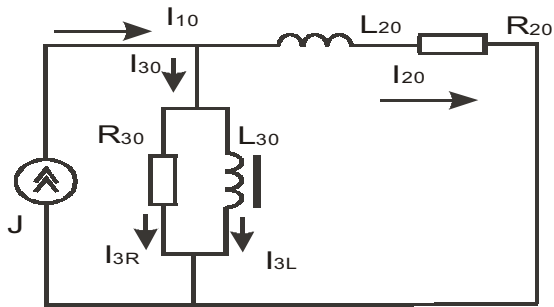


Рис. 3. Схема замещения трансформатора тока: I_{10} – первичный ток, задаваемый источником тока J ; I_{20} – вторичный ток; I_{30} – ток намагничивания; L_{20} , R_{20} – индуктивное и активное сопротивления вторичной цепи; L_{30} , R_{30} – индуктивное и активное сопротивления ветви намагничивания

После несложных преобразований получим систему из двух уравнений (16):

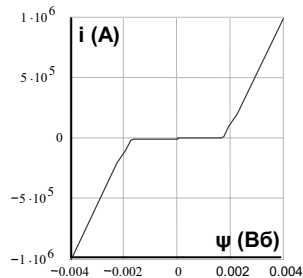
$$\left. \begin{aligned} \frac{dI_{20}}{dt} &= \frac{-(R_{20} + R_{30})}{L_{20}} \cdot I_{20} + \frac{-R_{30}}{L_{20}} \cdot I_{3L}(\Psi) + \frac{R_{30}}{L_{20}} \cdot I_{10}; \\ \frac{d\Psi}{dt} &= -R_{30} \cdot I_{20} - R_{30} \cdot I_{3L}(\Psi) + R_{30} \cdot I_{10}. \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

Нелинейные свойства цепи намагничивания описывает зависимость

$$i_{3L} = f(\psi) . \quad (17)$$

Для конкретного трансформатора тока вебер-амперная характеристика (17) может быть снята опытным путем или рассчитана по известным геометрическим размерам и свойствам стали сердечника. Пример использованной в расчетах обратной вебер-амперной характеристики приведен на рис. 4 (соответствует ТТ типа ТПЛ-10, ТПОЛ-10 1000/5 сердечники Р и 0,5).

Рис. 4. Обратная вебер-амперная характеристика ТТ



При моделировании характеристика намагничивания ТТ задается таблицей с подробным описанием всех нелинейных участков. Для решения системы (16) используется метод переменных состояний. Интегрирование осуществляется методом Рунге-Кутты с адаптацией шага. Входной информацией для моделей ТТ является цифровая осциллограмма первичного тока в формате COMTRADE, выходной – осциллограмма вторичного тока в том же формате. Во всех рассмотренных примерах осциллограмма состоит из трех участков: доаварийного, аварийного и послеаварийного. Причем в послеаварийном режиме ток равен 0.

Так как интегральный параметр, на который реагируют токовые реле МП терминалов, не известен, ниже рассмотрены несколько типов интегральных параметров (амплитуда, среднее по модулю и действующее значение). Все параметры вычисляются на интервале «период промышленной частоты» с шагом движения интервала, равным половине периода. В выражениях (1), (2), (6), (7) интегралы заменяются суммами. Так для реле, реагирующего на амплитудное значение, определяется амплитуда первой гармоники с использованием ортогонального разложения (дискретного преобразования Фурье). Указание на использование именно этого метода (для токового реле – дифференциальной отсечки) и имеется в [4].

Для вычисления интегрального средневывпрямленного значения использовались два алгоритма (два типа реле). Для одного реле по выражению (18) подсчитывается среднее значение не более чем за четверть периода (5 мс) от момента перехода тока через нуль. Шаг вычисления среднего принят равным шагу дискретизации по времени.

$$I_{cp}(k) = \frac{I}{N} \sum_{n=k-N+1}^k |i(n)|, \quad (18)$$

$$I_{\delta}(k) = \sqrt{\frac{I}{N} \sum_{n=k-N+1}^k i^2(n)}, \quad (19)$$

$$I_c(k) = \frac{2}{N} \sum_{n=k-N+1}^k i(n) \cdot \cos\left(2\pi \frac{n}{N}\right), \quad (20)$$

$$I_s(k) = \frac{2}{N} \sum_{n=k-N+1}^k i(n) \cdot \sin\left(2\pi \frac{n}{N}\right), \quad (21)$$

где N – число отсчетов на период промышленной частоты; k – текущий момент дискретного времени; $i(n)$ – отсчеты аналого-цифрового преобразователя.

Уставки реле, заданные в масштабе действующего значения тока, пересчитываются в масштаб среднего значения тока в соответствии с (10) и (11) по выражению

$$\frac{2 \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cdot I_{\delta}.$$

При вычислении среднего значения условия срабатывания реле определяются системой из двух уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{I}{K} \sum_{n=1}^k i(n) &\geq I_{ycm}, \\ K &\leq \frac{N}{4}. \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

Вычисление условий системы (22) может быть пояснено, если вместо суммы (22) рассмотреть приведенный ниже интеграл (23) при усло-

вии, что $K = \frac{N}{4}$ соответствует $\frac{T}{4}$. Очевидно, что среднее значение можно вычислить за четверть периода:

$$\frac{4}{T} \int_0^{T/4} I_m \sin(\omega \cdot t) dt = I_m \cdot \frac{2}{\pi}. \quad (23)$$

Приняв значение интеграла (23) за уставку, рассмотрим неравенство

$$\frac{4}{T} \int_0^{\tau} I_m \sin(\omega \cdot t) dt \geq I_{уст}. \quad (24)$$

Ясно, что при синусоидальных токах, больших, чем вычисленных по (23), неравенство (24) выполняется при $\tau < \frac{T}{4}$. Реле, реализующие такой алгоритм, известны [5]. Можно отметить, что при значительных погрешностях ТТ начало каждого полупериода искажается, как правило, меньше.

Считается, что реле должно по возможности реагировать на вынужденную составляющую тока. По этой причине в некоторых микропроцессорных защитах действующее значение вычисляется по выражению

$$I_{\partial} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left\{ \frac{1}{2} \left(i \cdot \left(t - \frac{T}{4} \right) - i(t) \right) \right\}^2 dt}. \quad (25)$$

В этом случае действующее значение вычисляется только для синусоидальной составляющей при наличии в токе постоянной составляющей

$$i(t) = I_0 + I_m \sin(\omega \cdot t), \quad (26)$$

$$i\left(t - \frac{T}{4}\right) = I_0 + I_m \sin(\omega \cdot t - \pi) = I_0 - I_m \sin(\omega \cdot t), \quad (27)$$

$$i\left(t - \frac{T}{4}\right) - i(t) = 2I_m \sin(\omega \cdot t). \quad (28)$$

Это свойство используется для фильтрации аperiodической.

Ниже рассматривается функционирование всех приведенных ниже реле (алгоритмов) при чисто синусоидальном и несинусоидальных токах. В табл. 1 приведены обозначения реле и соответствующие им способы вычисления тока.

*Моделирование аналоговых и цифровых реле тока
с учетом насыщения трансформатора тока*

Таблица 1. Реле тока с различными интегральными параметрами

Обозначение реле	Интегральный параметр
K1	среднее по (24)
K2	среднее по (1)
K3	амплитудное (6-8)
K4	действующее по (2)
K5	действующее по (25)
K6	РТ-40, модель по (12)

Функционирование всех указанных типов реле производилось в режимах, приведенных в табл. 2.

Таблица 2. Описание режимов, принятых для моделирования функционирования реле

Номер режима	Кратность (I / Iуст)	Постоянная времени, мс	Погрешность на 1,1/2 периодах, %	Погрешность в конце, %
1	1.2	0	0	0
2	1.2	30	80	34
3	3	30	80	34
4	1.2	52	80	34
5	3	52	80	34
6	1.2	300	80	34
7	3	300	80	34

Осциллограммы эксперимента в нестационарных режимах приведены на рис. 5, 6. Общее количество экспериментов равно 7 (табл. 2, 3). Так как качественно все осциллограммы выглядят примерно одинаково, приведены только две (с малой и большой постоянной времени). Положения контактов всех цифровых реле на рис. 6 (кривая «г») определяются табл. 3.

На всех осциллограммах: а – первичный и вторичный токи ТТ; б – импульсы, соответствующие выполнению неравенства (24); в – изменение действующего значения по (2) и линия уставки; г – изменение состояния контактов цифрового реле; д – изменение состояний контактов реле РТ-40.

Изменения состояний контактов реле, реагирующих на различные интегральные параметры, приведены в табл. 3. Для реле, реагиющего на среднее значение в пределах четверти периода, замыкание контакта соответствует первому импульсу в ряду импульсов с постоянной скважностью. Если принять для факта срабатывания не первый, а четвертый

импульс, то это реле ведет себя подобно остальным. Для реле РТ-40 состояние контактов задается тремя уровнями:

- нижним - замкнутое состояние нормально-замкнутого контакта;
- средним – разомкнутое состояние нормально-замкнутого и нормально-разомкнутого контактов;
- верхним – замыкание нормально-разомкнутого контакта.

Анализируя данные табл. 3, можно сделать вывод о работоспособности всех приведенных алгоритмов (реле). Следует отметить, что в любых режимах алгоритмы цифровых реле не подвержены дрейбегу, в то время как для реле РТ-40 существуют режимы с дрейбегом контактов (рис. 7). Общим выводом можно считать то, что все интегральные параметры, а следовательно, и реле, реагирующие на них, ведут себя приблизительно одинаково.

Таблица 3. Результаты функционирования моделей реле

Ре- жим	1 $\tau = 0$		2 $\tau = 0.03$		3 $\tau = 0.03$		4 $\tau = 0.052$		5 $\tau = 0.052$		6 $\tau = 0.3$	
	t_{cp}	$t_{вр}$	t_{cp}	$t_{вр}$	t_{cp}	$t_{вр}$	t_{cp}	$t_{вр}$	t_{cp}	$t_{вр}$	t_{cp}	$t_{вр}$
К1	5	0	65	0	5	0	90	0	45	0	265	0
К2	50	40	90	40	50	40	110	40	70	40	290	40
К3	50	40	90	40	50	40	110	40	70	40	270	40
К4	50	40	80	40	40	40	100	40	40	40	190	40
К5	50	40	90	40	60	40	110	40	80	40	260	40
К6	58	18	120	20	31	20	150	20	50	17	270	12

Библиографический список

1. **Шмурьев В.Я.** Цифровые реле защиты.– М.: НТФ "Энергопрогресс", 1999. – 56 с. ил. (Библиотечка электротехника, приложение к журналу "Энергетик"; Вып.1(4)).
2. **Жданов Л.С., Овчинников В.В.** Электромагнитные реле тока и напряжения РТ и РН. – М.: Энергия, 1971. – 72 с.
3. **Реле защиты / В.С. Алексеев, Г.П. Варганов, Б.И. Панфилов и др.** – М.: Энергия, 1976. – 464 с.
4. **Рекомендации по применению микропроцессорных устройств серии SPAC-800 / АББ Реле Чебоксары, 2000.** – 10 с.
5. **Чухин А.М., Лебедев О.В.** Магнитополупроводниковое реле тока // Изв. вузов. Электромеханика. – 1978. – № 9. – с.1016-1018.

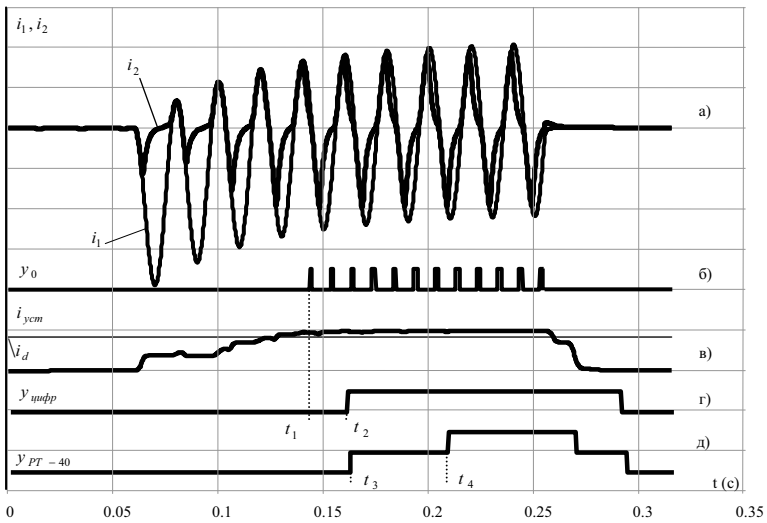


Рис. 5. Осциллограмма, иллюстрирующая функционирование реле в режиме 4

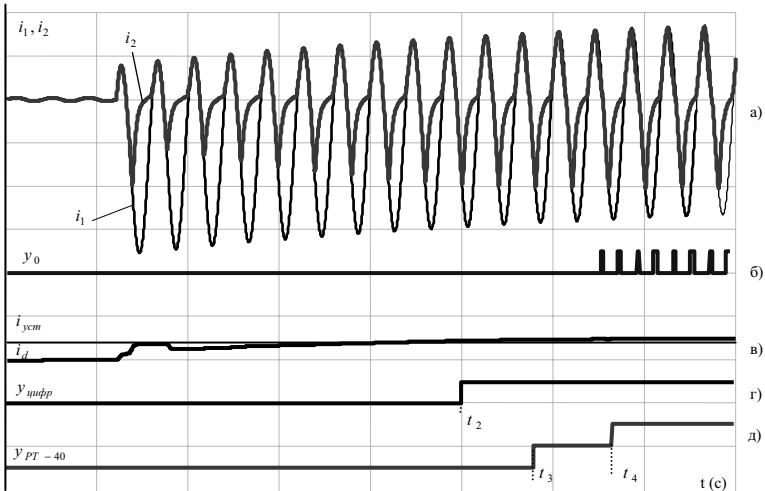


Рис. 6. Осциллограмма, иллюстрирующая функционирование реле в режиме 40.4 (начальное значение экспоненты $0,64 I_m$)

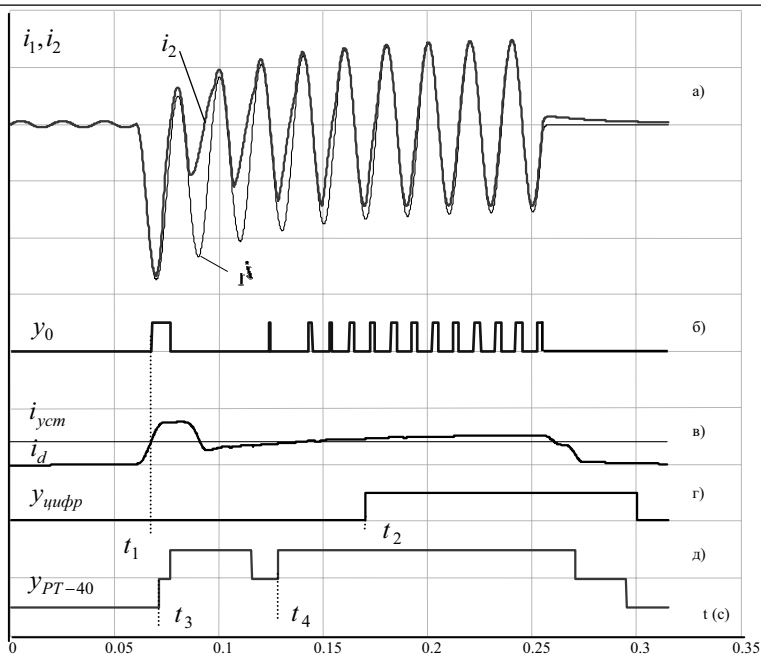


Рис.7. Осциллограмма, иллюстрирующая функционирование реле в режиме 4 (начальное значение экспоненты $0,64 I_m$)

УДК 621.039.56

Формализация модели деятельности в компьютерных тренажерах на основе экспертных систем

*В.Ф. Коротков, А.А. Фомичев, кандидаты техн. наук,
В.В. Никологорский, А.А. Савинов, инженеры*

В настоящее время постоянное поддержание и повышение уровня квалификации путем тренировок на компьютерных тренажерах стало неотъемлемой частью обучения оперативного персонала энергопредприятий.

Однако широкое применение компьютерных тренажеров сдерживается из-за необходимости разработки или учета уникальных моделей многочисленных технологических систем и энергетических объектов, а также соответствующих уникальных сценариев тренировок, что, в свою очередь, влияет на трудоемкость разработки, сроки реализации и стоимость тренажера.

Решение существующих проблем видится в разработке автоматизированных технологий и методов построения компьютерных тренажеров, обеспечивающих существенное сокращение трудозатрат на их создание и функционирование.

Компьютерные противоаварийные тренажеры, например для оперативного электротехнического персонала энергетических объектов, обычно состоят из следующих основных компонентов [1, 2, 3, 4]:

- информационной модели;
- модели объекта управления;
- модели деятельности (сценарий).

Из них наиболее сложна в разработке модель объекта управления и модель деятельности [1, 5]. В современных средствах разработки тренажеров наибольшее внимание уделяется автоматизации построения модели объекта управления [1, 4, 6]. При этом задача моделирования объекта управления решается с помощью процедурального программирования и в общем случае может быть реализована с помощью известных численных методов [1].

В большинстве известных тренажеров модель деятельности (сценарий тренировки) представляет собой некоторую детерминированную последовательность действий для достижения поставленной цели [3, 5, 7]. Содержание этой деятельности должно быть описано в виде совокупности операций управления [8].

Автоматизация создания модели деятельности часто сводится к оптимизации ввода операций управления, что предполагает создание модели деятельности непосредственно разработчиком и необходимость повторного ввода ее для каждого тренажера [1, 4, 6]. Поэтому актуальной является задача автоматической генерации модели деятельности либо на этапе создания, либо в процессе тренировки.

Задачу генерации модели деятельности можно свести к задаче поиска оптимального решения (в более общем случае удовлетворительного решения) [9], которая формулируется следующим образом.

Пусть заданы множества:

X – исходных данных (выводов, альтернатив, входных воздействий или параметров и т.п.),

Y – результатов (выходов, следствий, выходных параметров и т.п.),

V – критериев решения.

Множество V является упорядоченным (отношением \leq).

Заданы также выходная функция или отображение $P: X \rightarrow Y$ и оценочная функция или отображение $G: X \times Y \rightarrow V$. Тогда задача поиска оптимального решения определяется набором $\langle P, G, \tilde{X} \rangle$ и интерпретируется как поиск такого $\tilde{x} \in \tilde{X}$, что выполняется условие оптимальности

$$(\forall x \in \tilde{X})(g(\tilde{x}) \leq g(x)). \quad (1)$$

Множество X при этом называется множеством всех решений, множество $\tilde{X} \in X$ – множеством допустимых решений, а функция $g(x) = G(x, P(x))$ – целевой функцией.

Известно, что методы поиска решения можно классифицировать на строгие (дедуктивные методы) и эвристические (индуктивные методы) [9, 10]. Дедуктивные методы характеризуются точностью, четкостью и определенностью. В основе методов лежит поиск или вывод искомого целевого заключения по известным исходным посылкам и закономерностям. Индуктивным методам поиска решений присущи элементы неопределенности, нечеткости и неточности. Суть методов – установление закономерностей на базе эвристической информации, в основе которой лежат знания о специфике решаемой проблемы. По мере накопления знаний эвристические методы приобретают все большую определенность и переходят в класс строгих методов. Так как полное описание знаний о предметной области при создании тренажеров затруднительно, предпочтительно применение эвристических методов, и задача разработки сценария тренировки может быть сформулирована как задача эвристического поиска решения.

Пусть S – множество состояний предметной области, $\tilde{S} \in S$ – подмножество допустимых состояний, $S_0 \in \tilde{S}$, $S_k \in \tilde{S}$ соответственно подмножества начальных и конечных (целевых) состояний, $F: S \rightarrow S$ – множество преобразований состояний (операторов, процедур и т.п.), G – множество критериев оценки принимаемых решений. Каждое преобразование $f \in F$ реализует отображение $S_f \rightarrow S$, где $S_f \in S$ – область определе-

ния f . Тогда задача эвристического поиска формально задается набором $\langle S, \tilde{S}, S_0, S_k, F, G \rangle$ и интерпретируется как поиск последовательности преобразований $f_1, f_2, \dots, f_n \in F$, переводящей систему из заданного начального состояния $s' \in S_0$ в некоторое целевое $s'' \in S_k$, причем оптимальным образом согласно принятым критериям.

Теоретически решение в пространстве решений может быть найдено путем полного перебора в пространстве состояний. Однако число возможных состояний растет экспоненциально при линейном увеличении числа возможных операций. Подобное явление называют *комбинаторным взрывом* [11]. Для реальных предметных областей этот подход неприемлем из-за больших вычислительных затрат на поиск решения [9, 11]. Поэтому для поиска оптимального пути в пространстве состояний применяется оценочная функция вида

$$g(s) = q(s) + h(s), \quad (2)$$

где $q(s)$ – оценка пройденного пути, $h(s)$ – оценка оставшегося пути, базирующаяся на эвристической информации. Для упрощения допустимо не использовать оценку оставшегося пути, но это увеличивает конечное время поиска. Введение эвристической информации в целом приводит к уменьшению сложности поиска решения.

Для решения подобных задач наибольшее распространение получили экспертные системы, в которых используется моделирование, основанное на декларативном знании. Они позволяют создавать модели, являющиеся недетерминированными описаниями моделируемого процесса [9, 11, 12].

В общем случае к экспертным системам предъявляются следующие требования [12]:

- принимаемые системой решения должны соответствовать уровню эксперта-профессионала;
- способы принятия решения должны воспроизводиться в форме, понятной пользователю;
- система должна обладать возможностью использовать, приобретать и хранить общие и частные данные;
- в процессе жизненного цикла система должна обладать свойствами ревизии данных и рассуждений.

Исходя из названных требований к экспертным системам, можно выделить их основные элементы [12] (рис. 1):

- лингвистический процессор, осуществляющий связь системы с пользователем на неалгоритмическом языке;
- подсистему логического вывода, обеспечивающую построение схем рассуждения;
- базу знаний для хранения и обработки знаний;
- подсистему хранения текущих решений;
- подсистему приобретения знаний;
- подсистему ревизии знаний, позволяющую эксперту вмешиваться в ход принятия решения.

Важнейшим компонентом экспертных систем является база знаний [9, 12]. В базе знаний системы должна содержаться информация как о конкретных фактах и закономерностях предметной области, так и о более общих законах и правилах, позволяющих получить новую информацию. Основой успеха экспертной системы, проектируемой для средств автоматизации разработки тренажеров, является эффективная модель представления знаний, позволяющая не только накапливать информацию, но и эффективно ее обрабатывать [12]. Желательно также, чтобы на основе этой же модели можно было строить и сам сценарий разрабатываемой тренировки. Для выбора наиболее подходящей модели представления знаний необходимо иметь четкое представление о предметной области и способе приобретения знаний.

Описание предметной области.

1. Характерными решаемыми задачами автоматизированной системы разработки тренажеров является создание противоаварийных цеховых тренировок для оперативного персонала энергопредприятий. В них решаются задачи определения типа ненормального режима, остановка его развития и дальнейшего устранения.

2. К объектам предметной области тренажера можно отнести все оборудование энергопредприятий и смежные элементы. Сами участники тренировки также рассматриваются как объекты предметной области тренировки. Так как все действия, выполняемые по устранению ненормального режима, производятся в соответствии с нормативными и правовыми документами, они также относятся к объектам предметной области тренировки.

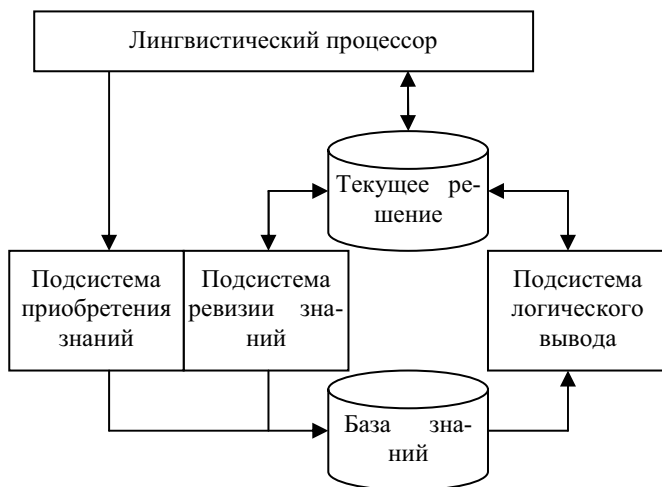


Рис. 1. Обобщенная структура экспертной системы.

3. Объекты предметной области имеют между собой связи, на основе которых экспертная система производит поиск решения. Большинство из объектов тренировки выстраиваются в иерархические структуры по отношению друг к другу, что позволяет упростить поиск решения и мониторинг базы знаний. Иерархия может строиться по территориальному признаку, назначению, уровню напряжения и т.д. Кроме того, необходимо предусмотреть связи модели деятельности с моделью объекта управления, которая часто строится на процедуральной основе.

Приобретение знаний.

Большинство наиболее общих объектов и их связей возможно задать на этапе разработки экспертной системы. Но частные связи конечных объектов не могут быть заданы на этом этапе, они вводятся непосредственно при построении тренажера. Таким образом, имеется необходимость пополнения базы знаний специалистом в предметной области. Следовательно, база знаний должна иметь семантику, известную этому специалисту, и четкую структуру (в частности, она может быть иерархической).

Исходя из перечисленных особенностей, структурная схема экспертной системы для решаемой задачи будет иметь вид, представленный на рис. 2.

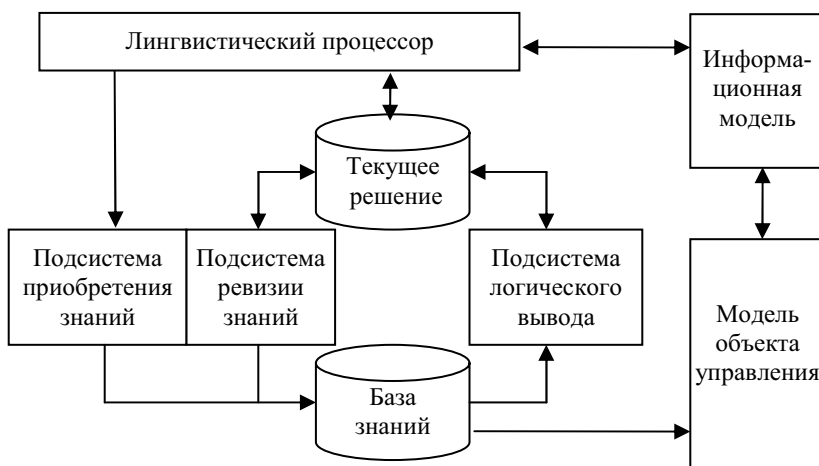


Рис. 2. Обобщенная структура тренажера на базе экспертной системы

В экспертных моделях в настоящий момент наиболее распространено несколько моделей базы знаний [12]:

1. *Продукционные*. Их основой является база правил «ЕСЛИ ... ТО...» Они обладают модульностью, единообразием и естественностью (вывод в продукционной системе аналогичен процессу рассуждений эксперта) [11, 12, 13]. Однако у них малоэффективен процесс вывода, и в интересующей предметной области базы знаний подобного типа трудно поддаются управлению [9, 12].

2. *Логика первого порядка* (исчисление предикатов). В его основе лежит язык математической логики, позволяющий формально описывать понятия предметной области и связи между ними. Данные модели позволяют строить экспертные системы с высокой эффективностью вывода, но они обладают серьезным недостатком – сложность отображения в модели семантики предметной области тренажеров [9].

3. *Графы, деревья и сети*. Они строятся на базе двух видов примитивов – узлов и связей. Узлы представляют собой исходящие и целевые пункты для связей и обычно каким-либо образом промаркированы. Наибольшее распространение получили взвешенные ориентированные графы - сети. Основное преимущество графов – структурированный подход

представления знаний [11]. Однако при представлении предметных областей, основанных на описании естественных объектов, размерность графов становится очень большой, что усложняет управление базой знаний [12] и требует всякого рода дополнительных структур, утрачивая при этом первоначальную простоту структурированного подхода [11].

4. *Фреймы*. Фрейм позволяет сконцентрировать все знания о данном классе объектов или событий в единой структуре данных наиболее естественным способом [14]. Они (знания) сосредоточены в самой структуре и доступны из нее. По существу фрейм позволяет связать декларативные и процедуральные знания о некоторой сущности в структуру записей, которая состоит из *слов* и *наполнителей* [11, 14], что позволяет описывать в терминах фреймов элементы объекта управления. Фреймы можно организовывать в виде «ослабленной иерархии» [11], в которой фреймы, расположенные ниже по иерархии, могут наследовать значения слотов разных фреймов, расположенных выше. Таким образом, фреймы реализуют объектно-ориентированный подход, что позволяет существенно упростить процесс наполнения базы знаний за счет механизма наследования (аккумулирования знаний), но в свою очередь влечет за собой определенную методологию разработки и соответствующий стиль программирования. Основным недостатком фреймовой системы является относительная трудоемкость механизма вывода [9].

Из рассмотренных моделей баз знаний фреймы наиболее полно и естественно описывают интересующую предметную область. Они позволяют представить предметную область тренажеров в наиболее приближенном виде к тому, в котором использует ее человек [14]. Фреймы дают возможность совместить в общей структуре данные, необходимые для построения модели деятельности (декларативное моделирование) и модели объекта управления (процедуральное моделирование), что в свою очередь позволяет объединить автоматизацию их разработки. Но фреймы требуют навыков объектно-ориентированного проектирования, поэтому их целесообразно использовать на этапе разработки средств построения тренажеров. Но на этапе построения тренажеров с помощью среды для пополнения базы знаний более предпочтительно использовать продукционный подход, как более простой для понимания специалистами в предметной области и не требующий дополнительных навыков.

Выводы

1. При разработке средств автоматизированного проектирования компьютерных тренажеров целесообразна автоматическая генерация мо-

дели деятельности, содержанием которой является поиск оптимального решения на основе эвристических методов и базы знаний о предметной области с использованием экспертных систем.

2. Применительно к компьютерным тренажерам (на этапе разработки средств для их создания) при описании базы знаний о предметной области из множества способов формализации предпочтительным является использование фреймов с возможностью пополнения базы знаний о предметной области в продукционном виде (на этапе эксплуатации средств разработки), что позволяет сделать модель деятельности более естественной и адекватной мышлению оперативного персонала в процессе принятия решений.

Библиографический список

1. **Автоматизация** построения тренажеров и обучающих систем / В.Д. Самойлов, В.П. Березников, А.П. Писаренко, С.И. Сметана. – Киев: Наук. думка, 1989. – 200 с.
2. **Управление** процессом отображения информации в компьютерных тренажерах / В.Ф. Коротков, В.В. Никологорский, А.А. Фомичев // Повышение эффективности работы ТЭС и энергосистем: Тр. ИГЭУ. Вып.1. – Иваново, 1997.
3. **Тренажеры** для диспетчерского персонала энергосистем и энергообъединений. Обзорная информация / В.Г. Орнов, В.А. Семенов. – М.: Информэнерго, 1984. – 42 с.
4. **Автоматизированная** система построения тренажеров оперативных переключений / С.И. Сметана. – Киев, 1988. – 37 с.
5. **Противоаварийный** тренажер для диспетчерского персонала электрических сетей / С.И. Сметана, И.А. Переверзев. – Киев, 1988. – 43 с.
6. **Автоматизация** моделирования энергетического оборудования человекомашинных систем энергетики / М.Ю. Федоров, О.Я. Стеценко – Киев: Общество «Знание», 1989. – 16 с.
7. **Коротков В.Ф., Никологорский В.В., Фомичев А.А.** Об опыте разработки САПР компьютерных средств обучения электротехнического персонала // Повышение эффективности работы ТЭС и энергосистем: Тр. ИГЭУ. Вып.1. – Иваново, 1997.
8. **Коротков В.Ф., Никологорский В.В., Фомичев А.А.** Формализация сценариев противоаварийных тренажеров для оперативного электротехнического персонала // Повышение эффективности работы ТЭС и энергосистем: Тр. ИГЭУ. Вып.1. – Иваново, 1997.
9. **Башлыков А.А., Еремеев А.П.** Экспертные системы поддержки принятия решений в энергетике. – М.: Изд-во МЭИ, 1994. – 216 с.
10. **Волков И.К., Загоруйко Е.А.** Исследование операций: Учеб. для вузов. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – 436 с.
11. **Джексон Питер.** Введение в экспертные системы. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2001. – 624 с.
12. **Чичварин Н.В.** Экспертные компоненты САПР. – М.:Машиностроение, 1991. – 240 с.
13. **Сойер Б., Фостер Д.Л.** Программирование экспертных систем на Паскале. – М.: Финансы и статистика, 1990. – 191 с.
14. **Минский М.** Фреймы для представления знаний: Пер. с англ. – М.: Энергия, 1979. – 152 с.

УДК 621.317.333.41

Контроль состояния изоляции цепей постоянного оперативного тока с компенсацией тока утечки

В.А. Савельев, д-р техн. наук, С.А. Словесный, канд. техн. наук

Надежная работа электроэнергетических систем невозможна без эффективного функционирования средств релейной защиты и автоматики (РЗА).

Причины нарушения работы устройств РЗА могут быть условно разделены на организационные и технические. Среди организационных причин неправильных срабатываний устройств называются недостатки технического и оперативного обслуживания, а также старение устройств РЗА. Основной технической причиной неправильных действий устройств РЗА считается неисправность электромеханических аппаратов. В то же время специалистами отмечается, что причины ряда нарушений работы устройств РЗА так и остаются невыясненными.

Оборудование вторичных цепей, и в частности цепей оперативного тока электрических станций и подстанций, территориально может быть удалено друг от друга на сотни и тысячи метров, что обуславливает значительную протяженность кабельных линий, а следовательно, большую емкость этих цепей относительно «земли» и сравнительно невысокое (порядка 100 кОм) сопротивление изоляции.

При определенных условиях (снижение сопротивления изоляции отдельных присоединений, коммутации в цепях оперативного, особенно постоянного, тока), сочетание большой емкости, незначительного сопротивления изоляции и высокого импеданса обмоток электромеханических аппаратов способно вызвать ложную работу или отказ устройств РЗА. С целью предупреждения нарушений работы устройств РЗА, вызванных повреждениями изоляции, «Правилами технической эксплуатации электрических станций и сетей» регламентируется процедура контроля сопротивления изоляции, поиска места ее повреждения и устранения дефекта, где указывается минимально допустимый уровень сопротивления, при котором еще возможна надежная работа сети (40 кОм).

Однако типовое устройство контроля сопротивления изоляции сетей оперативного постоянного тока (УКИСПТ) не регистрирует симметричного по полюсам снижения сопротивления изоляции, а при несимметричном снижении чувствительность и уставка срабатывания зависят от

соотношения сопротивлений изоляции отдельного поврежденного присоединения и сопротивления изоляции неповрежденной части сети.

Эта особенность работы типового устройства контроля сопротивления изоляции сетей оперативного постоянного тока обусловлена спецификой реализуемого в УКИСПТ мостового метода контроля. Указанное устройство вырабатывает предупредительный сигнал, если напряжение в диагонали моста, образованного двумя постоянными резисторами в одной паре плеч моста (рис. 1) и сопротивлениями изоляции полюсов сети оперативного постоянного тока (ОПТ), представляющими собой вторую пару плеч, превысит некоторую заранее заданную величину.

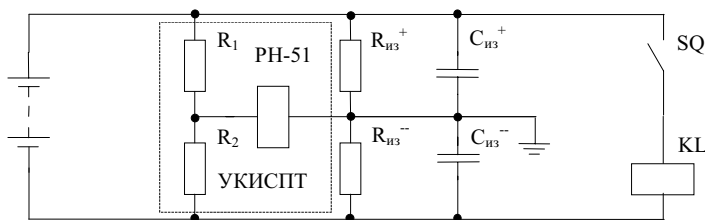


Рис. 1. Схема замещения сети постоянного оперативного тока: R_1, R_2 -элементы схемы УКИСПТ, создающие искусственную среднюю точку; $R_{из}^+$ - сопротивление изоляции положительного полюса сети относительно “земли”; $R_{из}^-$ - сопротивление изоляции отрицательного полюса сети относительно “земли”

При одновременном снижении сопротивления изоляции, например в результате ее увлажнения, равновесие моста не нарушается даже при металлическом замыкании на землю обоих полюсов сети.

Варьируя величину сопротивления изоляции полюсов сети ОПТ относительно «земли» при известных значениях сопротивления резисторов устройства контроля сопротивления, напряжении срабатывания и сопротивлении обмотки реле сигнализации, включенного в диагональ мостовой схемы, можно вычислить границы зоны неработоспособности, в пределах которой типовое УКИСПТ не регистрирует снижения сопротивления изоляции (рис. 2).

Таким образом, в сетях оперативного постоянного тока могут иметь место неконтролируемые нерегистрируемые снижения сопротивления изоляции, способные вызвать отказы в работе средств РЗА.

Для предотвращения возникновения подобного рода нарушений в работе сетей оперативного постоянного тока необходимо совершенствование методов и способов контроля сопротивления изоляции и определения места ее повреждения.

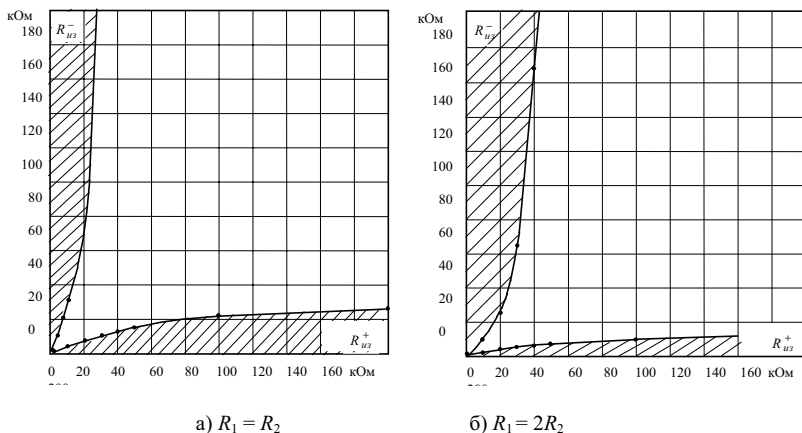


Рис. 2. Соотношение сопротивления изоляции положительного $R_{уз}^+$ и отрицательного $R_{уз}^-$ полюсов сети оперативного постоянного тока, обеспечивающее срабатывание УКИСПТ (— зона работоспособности устройства)

В основу работы практически всех устройств селективного контроля сопротивления изоляции положен принцип принудительного смещения потенциала контролируемой сети относительно «земли» с помощью постороннего источника вспомогательного напряжения и последующей оценки распределения токов утечки изоляции в отдельных присоединениях, возникающего под действием наложенного напряжения.

При использовании в качестве вспомогательного источника генератора синусоидальных колебаний последний соединяется с объектом контроля через один или два разделительных конденсатора, что практически полностью устраняет его влияние на режим и надежность работы сети оперативного тока. Подключение вспомогательного источника к одному полюсу контролируемой сети практически не создает различий в отыскании повреждений обоих полюсов, так как они связаны между собой низкоомными сопротивлениями аккумуляторной батареи и суммарной нагрузкой сети.

Распределение токов утечки изоляции в присоединениях оценивается с помощью стационарных или переносных электромагнитных датчиков, первичными обмотками которых являются фидеры контролируемых присоединений.

Наименее сложные из подобного рода устройств осуществляют контроль полного тока утечки изоляции отдельных присоединений. Очевидно

но, что емкостная составляющая тока утечки изоляции будет вносить погрешность в результаты измерений и величина последней будет тем больше, чем больше емкость контролируемого присоединения и частота синусоидально изменяющегося напряжения.

Относительная погрешность определения сопротивления изоляции присоединения $\delta R_{из.n}$, под которой здесь и далее понимается отношение абсолютной погрешности измерения к истинному значению измеряемой величины, вычисляется по формуле

$$\delta R_{из.n} = \frac{1 + \omega^2 C_p C_{из.n} R_{щ} R_{из.n} + j\omega C_{из} R_{из}}{j\omega C_p R_{из} (1 + j\omega C_{из.n} R_{из.n})}, \quad (1)$$

где ω - угловая частота синусоидально изменяющегося напряжения; C_p - значение емкости разделительного конденсатора; $C_{из.n}$ - значение емкости изоляции присоединения; $R_{щ}$ - активное сопротивление изоляции сети; $R_{из.n}$ - активное сопротивление изоляции присоединения; $C_{из}$ - значение емкости изоляции сети.

Оценка степени влияния отдельных параметров схемы замещения контролируемой сети и условий измерения на величину относительной погрешности может быть выполнена путем расчета на примере конкретной сети. Из результатов расчета следует:

- во-первых, погрешность измерения сопротивления существенно зависит от величины емкости разделительного конденсатора и имеет приемлемое значение лишь в том случае, если емкость разделительного конденсатора многократно превышает емкость изоляции контролируемого объекта относительно «земли», при этом значительно увеличивается суммарная емкость изоляции сети оперативного тока, что, по мнению специалистов, недопустимо;

- во-вторых, даже при подключении вспомогательного источника через разделительный конденсатор большой емкости погрешность измерения меняется в недопустимо широких пределах при уменьшении сопротивления изоляции присоединения от нормального значения до значений, соответствующих металлическому замыканию на «землю» (так, например, при $C_{из} = 30$ мкФ, $C_{из.n} = 1$ мкФ, $R_{щ} = 100$ кОм, $C_p = 150$ мкФ относительная погрешность измерения сопротивления возрастает от 2 до 61 % при уменьшении сопротивления изоляции отдельного присоединения от 100 до 1 кОм;

- в-третьих, контроль сопротивления должен осуществляться при низкой частоте напряжения вспомогательного источника, так как при

частотах более 1 Гц существенно увеличивается нелинейность зависимости относительной погрешности измерения сопротивления изоляции от истинного значения активного сопротивления изоляции присоединения; использование же электромагнитных датчиков для измерения столь медленно изменяющихся токов затруднено в связи с их низкой чувствительностью в частотном диапазоне от нуля до нескольких герц и сопряжено с необходимостью увеличения амплитуды напряжения вспомогательного источника, которое подается на шины контролируемой сети, что в ряде случаев недопустимо.

Все это существенно ограничивает область применения подобных устройств и инициирует поиск более эффективных технических решений в направлении совершенствования способов измерения активной составляющей тока утечки изоляции.

Частичное решение поставленной задачи дает применение фазочувствительных устройств [1], величина выходного сигнала которых пропорциональна разности фаз переменного синусоидально изменяющегося напряжения на шинах объекта контроля и токов в контролируемых присоединениях, отходящих от названных шин. Принцип работы подобных устройств основан на синхронном детектировании сигнала, несущего информацию о проводимости изоляции присоединения, и предполагает подведение к детектору управляющего напряжения, строго синхронного и синфазного детектируемому сигналу.

Полезный сигнал формируется под действием напряжения вспомогательного источника, частота которого отлична от промышленной, а управляющее напряжение, отводимое от шин сети оперативного тока, представляет собой спектр частот, в состав которого наряду с частотой вспомогательного источника входят промышленная частота и кратные ей высшие гармоники. Управляющее воздействие передается от полюсов сети к синхронному генератору через специальные конденсаторы, т. е. по частотно-зависимым цепям, ток в которых будет дополнительно модулироваться по фазе и амплитуде. Таким образом, нарушается основной принцип синхронного детектирования, а именно обеспечение синхронности и синфазности детектируемого и управляющего сигналов, что ведет к возникновению погрешности измерений. Для уменьшения данной погрешности необходимо, чтобы амплитуда напряжения вспомогательного источника была значительно выше амплитуды наведенного напряжения промышленной частоты и кратных ей гармонических составляющих. Этим обстоятельством, видимо, и обусловлен достаточно высокий уровень напряжения вспомогательного источника, равный 40 В [1].

По некоторым данным амплитуда наведенного напряжения промышленной частоты на полюсах контролируемых сетей может достигать 35 В [2], что соизмеримо с величиной напряжения вспомогательного источника, и в этих условиях синхронный детектор не может быть использован. Более того, указанная амплитуда вспомогательного напряжения вряд ли может считаться допустимой в сетях, содержащих схемы защиты и автоматики, выполненные на полупроводниковых элементах, обладающих большей чувствительностью, чем схемы выполненные на электромеханических реле. И наконец, данный способ измерения активной составляющей тока утечки изоляции при определении места ее повреждения требует выполнения многочисленных подключений к различным точкам сети специальных конденсаторов для передачи управляющего сигнала от полюсов сети к синхронному детектору, что может явиться причиной ложной работы устройств релейной защиты и автоматики в результате ошибочных действий оперативного персонала.

Указанные обстоятельства препятствуют широкому применению фазочувствительных устройств для определения места уменьшения сопротивления изоляции в разветвленных сетях, а в ряде случаев их использование принципиально невозможно, например, при контроле сопротивления цепей постоянного тока с напряжением источника оперативно-го тока, меньшим 110 В.

Принципиально отличным от описанных ранее способов контроля активного сопротивления изоляции является способ измерения активной составляющей тока утечки с предварительной компенсацией емкостной составляющей тока утечки изоляции на «землю».

Данный способ изначально разработан для определения общего активного сопротивления всей сети, но в принципе может быть использован для осуществления селективного контроля сопротивления изоляции, а при определенном усовершенствовании и дальнейшем развитии и для поиска места ее повреждения.

Синусоидально изменяющееся напряжение от вспомогательного источника подается через разделительный конденсатор и трансформатор тока на полюсы контролируемой сети. По первичной обмотке проходит полный ток утечки изоляции контролируемой сети, по вторичной, в цепи которой установлен компенсирующий конденсатор переменной емкости, – емкостный ток, фаза которого сдвинута на 180° относительно фазы емкостной составляющей тока утечки изоляции. Третья обмотка является измерительной, и ЭДС на ее выходе пропорциональна геометрической сумме активной составляющей тока утечки, емкостной составляющей то-

го же тока и тока в компенсирующей цепи. При определенной величине емкости компенсирующего конденсатора амплитуда тока в компенсирующей цепи численно равна амплитуде емкостной составляющей тока утечки изоляции. В этом случае ЭДС на выходе измерительной обмотки будет определяться только значением активной составляющей тока утечки, пропорциональной проводимости изоляции.

Существенным недостатком данного способа контроля сопротивления изоляции сети ОПТ является непостоянство емкости объекта контроля и связанная с этим необходимость корректировки компенсирующего тока.

Попытки осуществления контроля проводимости изоляции разветвленных сетей, имеющих значительную распределенную емкость на «землю», аппаратным путем, как показано выше, обладают определенными недостатками, поэтому часть специалистов, занятых в данной области, сосредоточила свои усилия в направлении разработки алгоритмов вычисления контролируемого параметра по совокупности измеренных характеристик изоляции. В ходе этих исследований создано устройство и разработана методика определения сопротивления изоляции, основываемые на измерении токов утечки изоляции при двух различных частотах изменения напряжения вспомогательного источника.

Вначале по известным значениям напряжения источников питания и соответствующим измеренным токам утечки вычисляют полное сопротивление изоляции на каждой из частот. Для рассматриваемых сетей его модуль определяется в основном величиной емкостной составляющей

$$Z_i = \sqrt{\frac{I}{\frac{I}{R^2} - \omega^2 C^2}}, \quad (2)$$

где Z_i – модуль импеданса изоляции сети на i -й частоте; R – активное сопротивление изоляции объекта; ω_i – угловая частота синусоидально изменяющегося напряжения i -го источника; C – емкость изоляции контролируемого объекта.

Совместное решение двух уравнений вида (2), соответствующих принятым значениям угловых частот напряжения вспомогательного источника ω_1 и ω_2 позволяет найти величину сопротивления изоляции объекта контроля

$$R = Z_1 Z_2 \sqrt{\frac{n^2 - 1}{n^2 Z_2^2 - Z_1^2}}, \quad (3)$$

где Z_1 и Z_2 – модули полного сопротивления изоляции соответственно на первой и второй частотах источника; $n = \frac{\omega_2}{\omega_1}$ – отношение частоты напряжения второго источника к частоте первого источника.

Чувствительность и разрешающая способность метода определяется оптимальностью выбора двух частот изменения напряжения вспомогательного источника.

Не подвергая сомнению практическую ценность использования данного метода, остановимся на рассмотрении нескольких вопросов, связанных с технической стороной его реализации. Во-первых, двухчастотный источник вспомогательного напряжения подключается к контролируемой сети через два разделительных конденсатора емкостью 100 мкФ [3], увеличивая тем самым в несколько раз значение собственной емкости сети на «землю». Подобное увеличение емкости сети нежелательно, так как даже в сетях со значительно меньшими величинами емкости по отношению к «земле» известны неоднократные случаи ложного срабатывания промежуточных реле при одиночных замыканиях на «землю» в цепях оперативного тока вследствие протекания тока перезаряда собственных емкостей полюсов сети через обмотку реле. Во-вторых, измерение токов двух разных частот, значение одной из которых составляет 1,56 Гц, предполагает использование электромагнитных датчиков тока. Выше отмечалось, что измерение медленно меняющихся токов затруднено по ряду причин и требует выполнения определенных мер, изменяющих условия работы электромагнитных датчиков. В качестве такой меры авторы выбрали подмагничивание магнитопровода датчика током дополнительного источника промышленной частоты. В этом случае конструкция датчика усложняется введением еще одного магнитопровода, имеющего общие с первым магнитопроводом измерительную и первичную обмотки, роль последней из которых выполняет фидер контролируемых присоединений, и размещением на каждом из магнитопроводов обмоток подмагничивания, соединенных встречно.

Из-за неизбежной неидентичности магнитного сопротивления двух различных магнитопроводов магнитные потоки в них, созданные токами подмагничивания, также будут отличными один от другого, а следовательно, и ЭДС, наведенная в измерительной обмотке потоком подмагничивания первого магнитопровода, не будет равна направленной встречно ЭДС, индуцированной в той же измерительной обмотке, но уже потоком

подмагничивания второго магнитопровода. Из-за этой разницы двух значений ЭДС на выходе измерительной обмотки наряду с полезным сигналом будет присутствовать некоторое напряжение, вызванное неидентичностью характеристик магнитопроводов.

Значение напряжения сигнала помехи может во много раз превосходить величину полезного сигнала, так как поток подмагничивания многократно превышает поток, создаваемый током утечки изоляции.

Указанные факты ставят под сомнение возможность использования двухчастотного метода и реализующего его устройства в том виде, как они описаны в первоисточниках, для контроля сопротивления изоляции сетей оперативного тока.

В Ивановском государственном энергетическом университете разработан способ контроля сопротивления изоляции и определения поврежденного участка в разветвленных сетях постоянного тока, основывающийся на принципах тестового диагностирования.

Контроль сопротивления изоляции и определение поврежденного присоединения осуществляются с использованием комплекта аппаратуры [4, 5], устанавливаемого на щите постоянного тока (ЩПТ). При этом измерение тока утечки изоляции присоединений может производиться с помощью стационарно установленных или переносных трансформаторных датчиков тока. Переносные датчики должны иметь разъемный магнитопровод, позволяющий размещать их на фидерах контролируемых присоединений без разрыва питания потребителей оперативного тока.

Для поиска места повреждения изоляции применяется переносный комплект, датчик которого реагирует на ток утечки, возникающий под действием вспомогательного напряжения, вырабатываемого аппаратурой, размещенной на щите постоянного тока.

Наиболее перспективным, в плане создания системы контроля сопротивления изоляции, является метод контроля, предполагающий компенсацию емкостной составляющей тока утечки, так как он, не имея основных недостатков, присущих большинству рассмотренных методов контроля, обладает такими важными положительными качествами, как высокая чувствительность, независимость от частоты изменения напряжения вспомогательного источника и отсутствие влияния на надежность и режимы работы контролируемой сети аппаратуры, входящей в состав измерительного комплекса. При этом нужно иметь в виду, что компенсируется не сам емкостный ток отдельного присоединения или всей сети в

целом, а лишь магнитный поток, создаваемый этим током в магнитопроводе соответствующего датчика.

Для решения задачи измерения активной составляющей тока утечки изоляции разработаны различные варианты компенсации влияния непостоянного во времени емкостного тока током компенсирующей обмотки датчика, изменяющимся по специальному закону. Для формирования компенсирующего тока может использоваться частотно-модулированное напряжение, подаваемое на индуктивный компенсирующий элемент, или амплитудно-модулированный сигнал, прикладываемый к компенсирующему конденсатору.

Функциональная схема системы контроля сопротивления изоляции на головных участках сети оперативного постоянного тока изображена на рис. 3. На схеме объект контроля 1 представлен источником оперативного напряжения 2, резистивной нагрузкой потребителей постоянного тока 3, сопротивлением изоляции присоединений 4 и емкостью участков сети оперативного тока на «землю» 5.

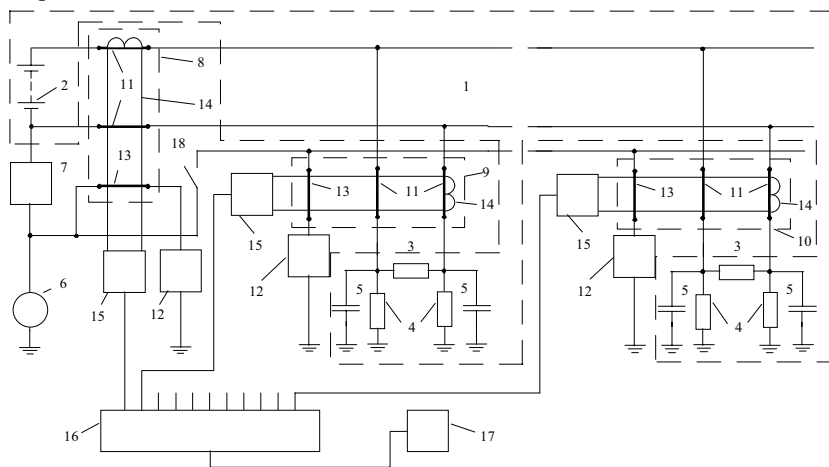


Рис. 3. Функциональная схема системы контроля сопротивления изоляции

Тестовый сигнал подается от источника вспомогательного напряжения 6 в контролируемую сеть через разделительный конденсатор 7 узла гальванической развязки. Разделительный конденсатор необходим для обеспечения постоянства общего сопротивления изоляции сети постоянному току при подключении устройства контроля. При этом емкость

конденсатора должна быть возможно меньшей, чтобы не вызвать снижения надежности работы потребителей оперативного тока вследствие увеличения общей емкости сети на «землю» и связанного с подобным увеличением возрастания токов перезаряда емкостей полюсов при одиночном замыкании в цепи нагрузки.

Измерение токов утечки изоляции, содержащих емкостную и активную составляющие, производится с помощью стационарных 8, 9 или переносных 10 электромагнитных датчиков, первичными обмотками 11 которых являются фидеры присоединений, отходящие от щита постоянного тока. Компенсация той части магнитного потока, которая создается в магнитопроводе датчика емкостной составляющей тока утечки, осуществляется током цепи, содержащей формирователь компенсирующего воздействия 12 и обмотку 13 датчика тока утечки.

С выхода измерительной обмотки 14 полезный сигнал, несущий информацию о величине сопротивления изоляции, через полосовой фильтр 15 поступает на коммутатор 16 и далее в блок обработки информации и индикации результатов измерений 17.

Поиск поврежденного присоединения начинается с того момента, когда сигнал с датчика 8 превысит заранее установленное значение, соответствующее минимально возможному, по условию надежной работы, сопротивлению изоляции всей сети. До этого времени токи в компенсирующие обмотки электромагнитных датчиков, установленных на присоединениях сети, не подаются, а сами датчики отключены от измерительного устройства.

Как только общее сопротивление изоляции уменьшится до установленного порогового значения, замыкается ключ 18 и производится последовательный опрос стационарных датчиков тока утечки 9. Если таким образом поврежденное присоединение не будет выявлено, дальнейший поиск должен выполняться путем измерения токов утечки изоляции оставшихся присоединений с использованием переносных датчиков 10. Процедура поиска завершается, если после перевода присоединения, имеющего наименьшее сопротивление изоляции, на резервный источник питания сопротивление оставшейся части сети превысит минимально допустимое для нормальной эксплуатации значение.

Алгоритм контроля сопротивления изоляции и определения поврежденного участка сети оперативного тока не зависит от способа компенсации влияния емкостной составляющей тока утечки. Выбор одного из двух разработанных вариантов контроля осуществляется на основе их сравнительного анализа с учетом реальных параметров сети и условий ее эксплуатации.

Выводы

1. Задача селективного контроля сопротивления изоляции сетей оперативного постоянного тока и определения места ее ухудшения в настоящее время в полном объеме не решена. Это делает актуальным продолжение работ по совершенствованию методов и технических средств контроля и измерения сопротивления изоляции распределительных сетей относительно «земли».

2. Область применения методов контроля сопротивления, основывающихся на измерении полного тока утечки изоляции или соответствующих токов двух различных частот, ограничена ввиду высокой погрешности результатов измерений и низкой чувствительности электромагнитных датчиков при измерении медленно изменяющихся токов.

3. Использование фазочувствительных устройств возможно лишь при условии многократного превышения амплитуды напряжения вспомогательного источника над амплитудой напряжения промышленной частоты, наведенного на полюсах контролируемой сети. Учитывая высокий уровень помех в сетях оперативного тока, выполнение данного требования практически невозможно.

4. Наиболее перспективным для решения поставленной задачи является метод, предусматривающий предварительную компенсацию емкостного тока утечки.

5. Разработанный метод контроля сопротивления изоляции цепей оперативного постоянного тока обладает наибольшей точностью по сравнению с аналогичными разработками, а также высокими чувствительностью и помехозащищенностью.

Библиографический список

1. **Овсянников А.А., Файбисович В.А., Шлык В.В.** Автоматизация поиска замыканий на землю в оперативных цепях постоянного тока // *Электр. станции.* – 1982. – № 2.
2. **Андрющенко Л.А., Савченко В.И.** О ложной работе выключателя блока при переходных процессах в цепях постоянного тока // *Электр. станции.* – 1982. – №7. – С 67-68.
3. **Устройство** для отыскания места замыкания на “землю” в сети постоянного оперативного тока / Р.А. Вайнштейн, Ю.В. Калуга, В.В. Потемкин, Е.Д. Коберник // *Изв. вузов СССР. Энергетика.* – 1987. – № 8. – С.52-55
4. **Пат. 2028638** РФ, МКИ G 01R 31/02, 31/08, 27/18. Способ контроля сопротивления изоляции разветвленных сетей постоянного и переменного тока /Б.Д. Дунаев, В.А. Савельев, С.А. Словесный, А.В. Усов, С.В. Шилов. (РФ). –4944837/21; Заявл. 13.06.91; Опубл. 09.02.95; Бюл. № 4. – 1995.
5. **Пат. 2052826** РФ, МКИ G 01R 27/18, 31/28. Устройство для поиска поврежденного участка в сетях постоянного и переменного тока /Б.Д. Дунаев, В.А. Савельев, С.А. Словесный, С.В. Шилов (РФ). –4933191/09; Заявл. 04.02.91; Опубл. 20.01.96; Бюл. № 2. – 1996.

УДК 621.313.013.8.004.652

Синтез систем аварийного управления мощностью турбины и возбуждением генератора с использованием метода функций Ляпунова

В.А. Коротков, канд. техн. наук, М.Ш. Мисриханов, д-р техн. наук

Введение. Повышение режимной управляемости ЭЭС России в условиях неизбежных ограничений технологической инфраструктуры субъектов оптового рынка энергии является одним из основных факторов, содействующих снижению его рисков и оптимизации издержек [1].

К технологическим ограничениям рынка энергии относятся требования обеспечения заданного качества электрической энергии по частоте и уровням напряжения, допустимые режимы эксплуатации оборудования, в том числе по условиям устойчивости параллельной работы электростанций в нормальных и аварийных режимах энергосистем, условия использования гидроресурсов, выбросы вредных веществ в окружающую среду при работе ТЭС и иные факторы.

Выполнение технологических ограничений потребует более широкой, чем сейчас, автоматизации управления нормальными и аварийными режимами функционирования ЭЭС России. При аварийных возмущениях в ЭЭС устройства автоматического управления призваны сохранить устойчивость в “большом” параллельной работы всех энергоустановок, обеспечить живучесть всей энергосистемы и надежность электроснабжения потребителей.

С развитием рыночных отношений в электроэнергетике и «усложнением» взаимоотношений между потребителями и продавцами электроэнергии проблема обеспечения устойчивости параллельной работы генерирующих компаний приобретает особую актуальность. Эта проблема многообразна и в последнее время усложняется по мере старения основного и вспомогательного оборудования электрических станций и сетей. Насыщенность современных ЭЭС высокоэффективными быстродействующими устройствами автоматического управления, в частности регулирования возбуждения сильного действия синхронных генераторов, регулирования скорости турбин, а также все более широкое использование противоаварийного управления мощностью паровых и гидравлических

турбин обеспечили возможность полного использования связей по условиям статической (в “малом”) и динамической (в “большом”) устойчивости и интенсивного подавления электромеханических колебаний. С другой стороны, увеличение числа и рост интенсивности управляющих воздействий усложнили связи энергосистем. Неудачный выбор законов управления или настроек регуляторов приводит не только к ограничениям мощностей, передаваемых в нормальных и послеаварийных режимах, но и с учетом больших потенциальных возможностей силовой части систем управления существенным образом влияет на протекание переходных процессов, снижая пределы динамической устойчивости и приводя к непредсказуемому развитию аварий в условиях многократных возмущений. Случаи нарушения устойчивости, сопровождающиеся незатухающими электромеханическими колебаниями, вызванными низкой эффективностью средств управления, неоднократно отмечались в нашей стране и за рубежом.

Таким образом, улучшение демпферных свойств системы, обеспечение устойчивости и высокого качества регулирования во всех схемно-режимных и аварийных условиях является чрезвычайно важной и актуальной задачей, решение которой способствует повышению надежности энергоснабжения потребителей и живучести энергообъединения.

Многосвязность и многорежимность сложных энергосистем как объектов управления ограничивают возможность решения поставленной задачи путем формирования преимущественно заранее рассчитанных программных управляемых воздействий или корректировок законов управления по сигналам соответствующих датчиков, распознающих ту или иную (в том числе и заранее не предусмотренную) режимную или аварийную ситуацию. Рациональным путем является разработка регулярных методов синтеза законов управления и выбор используемых в них переменных состояния в виде наблюдаемых комбинаций режимных параметров, физически правильно отражающих особенности сложного многократного движения вне зависимости от изменяющихся схемно-режимных условий работы энергосистем.

Многолетняя научная и инженерная работа авторов в области кибернетики электроэнергетических систем убедила в том, что наиболее результативными являются подходы, основанные на методе ФОР А.А. Красовского и теории оптимальной стабилизации движения на основе метода функций Ляпунова [3-9]. Эти методы позволяют в большинстве случаев получить физически обоснованную объективную оценку управляемости и области устойчивости и решить задачу синтеза законов управления самими распространенными энергетическими объектами (генераторами,

турбинами, управляемыми реакторами, управляемыми источниками реактивной мощности и т.д.) в виде несложных функций наблюдаемых режимных параметров, которые реализуются в конкретных технических управляющих устройствах минимальной сложности.

В настоящей статье рассматриваются вопросы синтеза систем аварийного управления мощностью турбины и возбуждением генератора с использованием теории оптимальной стабилизации движения с применением метода функций Ляпунова.

Основные принципы синтеза законов управления на основе теории оптимальной стабилизации движения. Эти принципы сводятся к следующим основным положениям [3].

Уравнения управляемой (регулируемой) системы имеют вид

$$\frac{dx_i}{dt} = f_i(x) + \Phi_i(x, u) \quad (i = 1, \dots, n), \quad (1)$$

где $f_i(x)$ - непрерывные функции фазных координат системы $x \{x_1, \dots, x_n\}$; $f_i(0) = 0$ ($i = 1, \dots, n$); $\Phi_i(x, u)$ - функции координат и управлений $u \{u_1, \dots, u_n\}$ при $u_i = 0$, $\Phi_i(x, u) = 0$ ($i = 1, \dots, n$).

Рассмотрим задачу об оптимальной стабилизации [3], в которой требуется найти управляющие воздействия $u_i = u^o(x)$, обеспечивающие асимптотическую устойчивость невозмущенного движения $x_i = 0$ системы (1) при условии минимума критерия качества

$$J = \int_{t=0}^{\infty} \omega(x, u) dt, \quad (2)$$

где $\omega(x, u)$ - неотрицательная функция.

Искомые управляющие воздействия $u = u^o(x)$ должны удовлетворять уравнению в частных производных относительно функции V^o , называемой функцией Ляпунова [3]:

$$\sum_{i=1}^n \frac{\partial V^o}{\partial \dot{x}_i} [f_i(x) + \Phi_i(x, u^o)] + \omega(t, x, u^o) = 0. \quad (3)$$

Численное решение уравнения (3) для нелинейных систем связано со значительными вычислительными трудностями. Их удается обойти, если принять подинтегральную функцию ω в виде

$$\omega = -\frac{dV^o}{dt}, \quad (4)$$

где V^o - функция Ляпунова системы (1).

С учетом выражений (3) и (4) для уравнений $u = u^o(x)$, решающих задачу об оптимальной стабилизации системы (1), потребуем выполнения условия

$$\text{sign } \Phi_i(x, u^o) = -\text{sign } \frac{\partial V^o}{\partial x_i}. \quad (5)$$

Воспользуемся условием (5) для выбора возможных законов систем аварийного управления мощностью и возбуждением турбо- или гидроагрегата, работающего на мощную приемную энергосистему (рис. 1).

Синтез законов аварийного управления возбуждением генератора (АУВГ). Современные генераторы оснащены системами возбуждения с высокими эксплуатационными показателями. Ведутся работы по дальнейшему повышению быстродействия, форсировочных возможностей, надежности систем возбуждения [1]. Эффективность использования АУВГ для повышения динамической устойчивости энергосистем в значительной мере определяется законом управления. Формированию законов АУВГ уделяется большое внимание в работах отечественных и зарубежных авторов [2]. Однако ввиду сложности эта проблема окончательно не решена. Требуется проведение дальнейших исследований по разработке методики выбора законов АУВГ; необходимо накопить опыт их работы в различных схемах и режимах энергосистем [2].

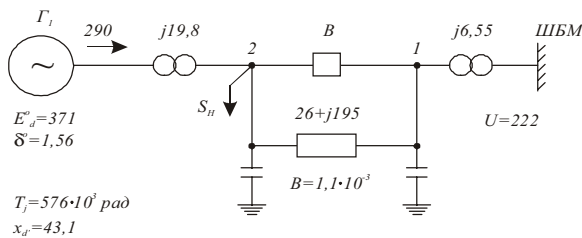


Рис. 1. Схема энергосистемы (B - выключатель)

Для синтеза законов аварийного управления возбуждением генератора рассмотрим генератор, работающий на мощную приемную энергосистему (рис. 1). Уравнения движения генератора представим в виде

$$\frac{d\delta}{dt} = s; \quad (6)$$

$$T_j \frac{ds}{dt} = P_T - P_{ЭЛ} - K_D s; \quad (7)$$

$$T_{d0} \frac{dE_d}{dt} = A[-E_d] + \frac{U_0(x_d - x'_d)}{z_{12}} s \cdot \sin(\delta - \alpha_{12}) + \frac{x_{ad} u_f}{R_f}; \quad (8)$$

$$A = \frac{z_{11}}{z_{11} - (x_d - x'_d) \cos \alpha_{11}};$$

$$P_{ЭЛ} = \frac{E_d^2}{z_{11}} \sin \alpha_{11} - \frac{E_d U_c}{z_{12}} \sin(\delta - \alpha_{12}), \quad (9)$$

где δ - угол вектора ЭДС холостого хода E_d относительно вектора напряжения системы U_c ; s - скольжение генератора; P_T - мощность на валу турбины; $P_{ЭЛ}$ - активная мощность генератора; K_D - постоянный коэффициент демпфирования; T_j - постоянная инерции ротора; T_{d0} - постоянная времени обмотки возбуждения; u_f - напряжение на кольцах ротора ($-u_{f\text{МИН}} < u_f < u_{f\text{МАКС}}$); z_{11} , z_{12} , α_{11} , α_{12} - модули собственных и взаимных сопротивлений генераторов и их дополнительные углы; x_d , x'_d , x_{ad} - реактивные сопротивления генератора; R_f - активное сопротивление обмотки возбуждения.

Представим ЭДС E_d и активную мощность генератора суммой двух слагаемых:

$$\left. \begin{aligned} E_d &= E_d^o + \Delta E_d; \\ P_{ЭЛ} &= P_{ЭЛ}^o + \Delta P_{ЭЛ}. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

где E_d^o - величина ЭДС в установившемся послеаварийном режиме; $P_{ЭЛ}^o$ - активная мощность генератора при неизменной ЭДС $E_d = E_d^o$;

$$P_{ЭЛ}^o = \frac{(E_d^o)^2}{z_{11}} \sin \alpha_{11} + \frac{E_d^o U_c}{z_{12}} \sin(\delta - \alpha_{12}); \quad (11)$$

ΔE_d - отклонение ЭДС; $\Delta P_{\text{ЭЛ}}$ - приращение мощности, обусловленное отклонением ЭДС.

На величину ΔE_d наложены ограничения

$$\Delta E_{\text{дМИН}} \leq \Delta E_d \leq \Delta E_{\text{дМАКС}}; \Delta E_{\text{дМИН}} \leq 0; \Delta E_{\text{дМАКС}} \geq 0, \quad (12)$$

определяющие область изменения отклонения ЭДС.

Преобразуя выражение $P_{\text{ЭЛ}}$ (9) с учетом (10) и (11), получим

$$\Delta P_{\text{ЭЛ}} = \frac{\Delta E_d^2}{z_{11}} \sin \alpha_{11} + \Delta E_d \Phi(\delta), \quad (13)$$

где

$$\Phi(\delta) = \frac{2E_d^0}{z_{11}} \sin \alpha_{11} + \frac{U_c}{z_{12}} \sin(\delta - \alpha_{12}),$$

или

$$\Delta P_{\text{ЭЛ}} = \Delta E_d \left[\frac{E_d^0}{z_{11}} \sin \alpha_{11} + \frac{P_{\text{ЭЛ}}}{E_d} \right]. \quad (14)$$

За критерий качества примем максимальную скорость убывания в каждый момент времени переходного процесса меры отклонения угла $\Delta\delta$ от его значения в установившемся режиме δ^0 и скольжения генератора. В общем случае такой мерой может служить любая знакоопределенная функция координат $\Delta\delta$ и s . Для этих целей можно использовать функции Ляпунова $V = V(\Delta\delta, s)$, полученные для системы уравнений (6)-(7) без учета изменения ЭДС.

Критерий качества можно представить в виде

$$J_1 = \min_{\Delta E_d \in \Omega} \frac{dV}{dt}, \quad (15)$$

где

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\partial V}{\partial \Delta\delta} s + \frac{\partial V}{\partial s} (P_T - P_{\text{ЭЛ}} - K_D s) \frac{1}{T_j}. \quad (16)$$

Выражение (15) эквивалентно критерию качества (2), когда подынтегральная функция ω имеет вид (4).

Выбор закона АУВГ проведем в два этапа. На первом этапе получим требование к характеру изменения отклонения ЭДС ΔE_d^* для решения задачи об оптимальной стабилизации.

На втором этапе определим характер изменения напряжения u_f^* на кольцах ротора, обеспечивающий требуемое изменение отклонения ЭДС ΔE_d^* .

С учетом (5) для решения задачи об оптимальной стабилизации приращение мощности должно удовлетворять условию

$$\text{sign} \Delta P_{\text{ЭЛ}} = \text{sign} \frac{\partial V}{\partial s}. \quad (17)$$

В табл. 1 приведено изменение знака $\Delta P_{\text{ЭЛ}}$ (13) в зависимости от знака функции $\Phi(\delta)$ на интервале изменения

$$\Delta E_{d\text{МИН}} < \Delta E_d < \Delta E_{d\text{МАКС}}.$$

Таблица 1. Анализ знака приращения $\Delta P_{\text{ЭЛ}}$

Знак $\Delta P_{\text{ЭЛ}}$		+		-	
Знак $\Phi(\delta)$		+	-	+	-
Интервал изменения ΔE_d	$\Delta E_{d\text{МИН}}$	0	$\Delta E_{d\text{МИН}}$	$-\frac{\Phi(\delta)}{\sin \alpha_{11}} z_{11}$	0
	$\Delta E_{d\text{МАКС}}$	$\Delta E_{d\text{МАКС}}$	0	0	$-\frac{\Phi(\delta)}{\sin \alpha_{11}} z_{11}$

Табл. 1 определяет ограничения, которым должны удовлетворять отклонения ЭДС для выполнения соотношения (17). Для минимизации полной производной (16) наряду с условием (17) следует обеспечивать наибольшую величину модуля приращения мощности $\Delta P_{\text{ЭЛ}}$, т.е.

$$\max_{\Delta E_d \in \Omega} |\Delta P_{\text{ЭЛ}}|.$$

Анализ выражения $\Delta P_{\text{ЭЛ}}$ показал, что требования к оптимальному отклонению ЭДС ΔE_d^* в зависимости от знака функций $\frac{\partial V}{\partial s}$ и $\Phi(\delta)$ удовлетворяют условиям, приведенным в табл. 2.

Синтез систем аварийного управления мощностью турбины и возбуждением генератора с использованием метода функций Ляпунова

Таблица 2. Требования к оптимальному отклонению ЭДС

Знак $\frac{\partial V}{\partial s}$	+		-	
Знак $\Phi(\delta)$	+	-	+	-
Оптимальная величина отклонения ЭДС ΔE_d^*	$\Delta E_{d\text{МАКС}}$	$\Delta E_{d\text{МИН}}$	$-\frac{\Phi(\delta)z_{11}}{2 \sin \alpha_{11}}$	$-\frac{\Phi(\delta)z_{11}}{2 \sin \alpha_{11}}$

При вычислении величины ΔE_d^* по соотношениям, приведенным в двух последних столбцах табл. 2, необходимо учитывать ограничения на отклонения ЭДС (12). Как видим, табл. 2 выражает табличную форму записи алгоритма управления отклонением ЭДС для минимизации критерия качества (15). Управление формируется по параметрам переходного процесса генератора ($\Delta\delta$ и s) и схемы замещения энергосистемы (z_{11} , α_{11} , z_{12} , α_{12}).

В тех случаях, когда вычисление в темпе процесса параметров схемы замещения z_{11} , α_{11} , z_{12} , α_{12} не представляется возможным, закон АУВГ, формируемый по информации, доступной для измерения, можно получить, используя выражение для $\Delta P_{\text{ЭЛ}}$ (14). Для выполнения соотношения (17) приращение ЭДС должно удовлетворять условию

$$\text{sign } \Delta E_d = \text{sign} \left[\left(\frac{E_d^0}{z_{11}} \sin \alpha_{11} + \frac{P_{\text{ЭЛ}}}{E_d} \right) \frac{\partial V}{\partial s} \right]. \quad (18)$$

Условие (18) может быть упрощено, если пренебречь первым слагаемым в его правой части. Как показали исследования, такое допущение не оказывает существенного влияния на эффективность закона АУВГ в силу малой величины дополнительного угла α_{11} . Обычно в энергосистемах величина α_{11} не превышает 0,15 рад. С учетом принятого допущения условие (18) перепишем в виде

$$\Delta E_d^* = K \frac{P_{\text{ЭЛ}}}{E_d} \frac{\partial V}{\partial s}, \quad (19)$$

где K - положительный коэффициент.

Соотношение (19) выражает требование к изменению ΔE_d для минимизации полной производной (16).

Определим напряжение на кольцах ротора u_f^* , обеспечивающее выполнение условия (19).

Подставляя (19) в уравнение обмотки возбуждения (8), получим закон АУВГ в виде

$$u_f^* = \frac{R_f T_{d0}}{x_{ad}} \frac{d\Delta E_d^*}{dt} + \frac{R_f A}{x_{ad}} (E_{d0} + \Delta E_d^*) - \frac{R_f U(x_d - x'_d)}{x_{ad} z_{12}} s \cdot \sin(\delta - \alpha_{12}). \quad (20)$$

Принимая K достаточно большим по величине, упростим выражение (20), для чего пренебрежем членами, не содержащими коэффициент K . С учетом (19) упрощенный закон АУВГ запишется в виде

$$u_f^* = K_I \Gamma T_{d0} \left(\frac{dP_{\text{ЭЛ}} E_d - P_{\text{ЭЛ}} \frac{dE_d}{dt}}{E_d^2} \right) \frac{\partial V}{\partial s} + T_{d0} \frac{P_{\text{ЭЛ}}}{E_d} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial V}{\partial s} \right) + A \frac{P_{\text{ЭЛ}}}{E_d} \frac{\partial V}{\partial s} J, \quad (21)$$

где K_I - большой коэффициент.

Обозначим через $F(P_{\text{ЭЛ}}, E_d, \delta, s)$ выражение, стоящее в правой части (21). Тогда с учетом ограничений на величину u_f закон АУВГ (21) можно представить в виде

$$\begin{aligned} u_f^* &= -u_{\text{МИН}} \quad \text{при } F(P_{\text{ЭЛ}}, E_d, \delta, s) < 0; \\ u_f^* &= u_{\text{МАКС}} \quad \text{при } F(P_{\text{ЭЛ}}, E_d, \delta, s) > 0. \end{aligned} \quad (22)$$

Численные исследования показали, что закон АУВГ (22) обеспечивает повышение динамической устойчивости энергосистемы и улучшает демпфирование колебаний переходного процесса.

В качестве примера рассмотрим характерные переходные процессы в энергосистеме, схема которой приведена на рис. 1.

Функция Ляпунова V взята в виде квадратичной формы:

$$V = \frac{1}{2} s^2 + \gamma s \Delta \delta + \frac{a}{2} \Delta \delta^2, \quad (23)$$

где

$$a = \frac{1}{T_j} \frac{E U_c}{z_{12}} \cos(\delta^o - \alpha_{12}); \quad \gamma = a.$$

При отключении выключателя B без АУВГ генератор выпадает из синхронизма в сторону ускорения (рис. 2).

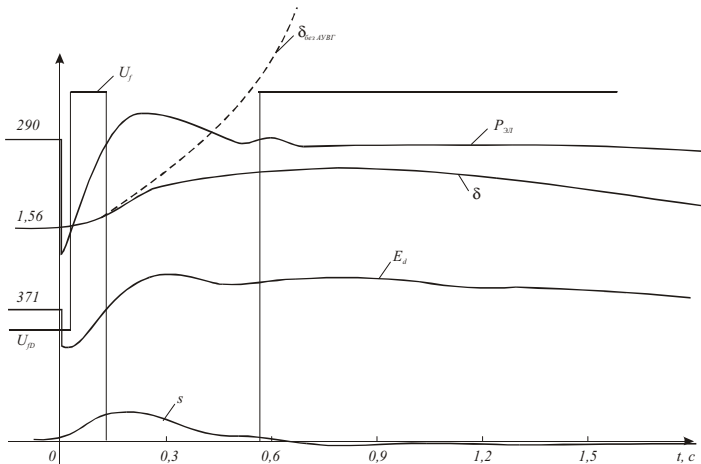


Рис. 2. Переходный процесс в энергосистеме при отключении выключателя B :
 $\delta_{\text{без АУВГ}}$ - изменение угла генератора без учета АУВГ

Аварийное управление возбуждением по закону (22) обеспечивает сохранение устойчивости. Процесс управления характеризуется тремя переключениями напряжения на кольцах ротора типа "форсировка" или "расфорсировка". Перевод генератора в режим с нормальным уровнем напряжения возбуждения следует осуществлять после полного затухания качаний в энергосистеме.

Если при работе генератора при отключенном выключателе происходит наброс нагрузки 20 МВт в узле 2 с последующей аварийной разгрузкой блока до 30 % его номинальной мощности, то без АУВГ генератор выпадает из синхронизма в сторону переторможения (рис. 3); АУВГ по закону (22) предотвращает нарушение устойчивости.

Задачами дальнейшего развития предложенного метода формирования закона аварийного управления возбуждением генератора следует считать необходимость учета в законе АУВГ уровня напряжения в энергосистеме, отыскание вида функции Ляпунова, наиболее полно удовлетворяющей проблемам АУВГ, необходимость проверки закона АУВГ в условиях сложных энергосистем.

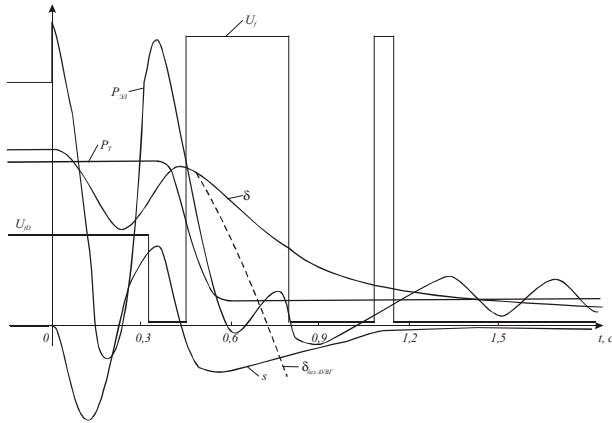


Рис. 3. Переходный процесс в энергосистеме при бросе нагрузки:
 $\delta_{\text{без АУВГ}}$ - изменение угла генератора без учета АУВГ

Синтез законов аварийного управления мощностью паровых турбин (АУМПП). Выбор законов аварийного регулирования турбин тоже является важным вопросом для увеличения устойчивости энергосистем [5-7]. Для решения этой задачи в уравнениях движения агрегата (6)-(9), уравнение (7) представим в виде

$$T_{Ji} \frac{ds_i}{dt} = (P_{Ti}^0 + \Delta P_{Ti}) - P_{ЭJi} - K_{Дi} s_i, \quad i = 1, \dots, n; \quad (24)$$

где P_{Ti}^0 – мощность турбины в нормальном режиме; ΔP_{Ti} – приращение мощности турбины для стабилизации движения ЭЭС.

Следуя принципам синтеза (3) - (5), искомое выражение закона (5) для системы (6)-(9), с учетом (24), управляемой безынерционной турбиной, имеющей неограниченный диапазон изменения мощности, имеет вид

$$\text{sign } \Phi_i(x, u_i^0) = -\text{sign} \frac{\partial V^0}{\partial x_i} = \text{sign } \Delta P_{Ti}^*. \quad (25)$$

Однако при выборе класса управляющих воздействий u_i^0 необходимо учитывать следующие обстоятельства. Формально для получения ми-

нимума выражения (2) (из решения уравнения (3) с учетом (25)) управления u_i^0 могут принадлежать к классу кусочно-непрерывных функций:

$$u_i^0 \square u_i^* = -\rho_i \cdot \text{sign} \left\{ \frac{\partial V}{\partial x_i} \right\}; \quad i = 1, \dots, n. \quad (26)$$

Однако техническая реализация закона управления (26) в большинстве случаев неосуществима из-за таких особенностей управляющих устройств, как инерционность, насыщение, запаздывание. Поэтому приходится релейный закон (26) аппроксимировать с помощью непрерывных функций вида

$$u_i^* = -k_{\rho_i} \cdot \rho_i \cdot \left\{ \frac{\partial V}{\partial s_i} \right\} \quad (i = 1, \dots, n), \quad (27)$$

где k_{ρ_i} – большой положительный коэффициент; ρ_i – ограничение на величину u_i .

Следует отметить, что чем больше k_{ρ_i} , тем лучше выражение (27) аппроксимирует закон управления (26).

Часто в системе (1) на управляющие воздействия, кроме ограниченной по модулю, накладываются ограничения в виде дифференциальных уравнений. Такой случай рассмотрен ниже, где производится выбор оптимального управления паровой турбины. Для простоты рассматривается описание паровой турбины одним аperiodическим звеном с постоянной времени T_{si} :

$$T_{si} b_i \frac{d\Delta P_{Ti}}{dt} = -\Delta P_{Ti} - u_{Ti}, \quad i = 1, \dots, n, \quad (28)$$

где u_{Ti} – положение регулировочного клапана.

Рассматривается ограничение на величину u_{Ti} :

$$-\rho_{1i} \leq u_{Ti} \leq \rho_{2i} \quad (i = 1, \dots, n), \quad (29)$$

где ρ_{1i} и ρ_{2i} определяют предельные отклонения регулировочного клапана.

Уравнение (28) можно рассматривать как ограничение на скорость изменения управляющего воздействия – приращения мощности турбины.

Постоянная времени T_{si} принимает различные значения при закрытии и открытии клапана, поскольку временная характеристика сервомотора несимметрична.

В качестве функции Ляпунова рассмотрим квадратичную форму, аналогичную (23), но записанную для сложной ЭЭС [5-7]:

$$V = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (a_{ij} \delta_i \delta_j + \gamma_{ij} \delta_i s_j + c_{ij} s_i s_j), \quad (30)$$

где a_{ij} , γ_{ij} , c_{ij} – постоянные коэффициенты.

Функция Ляпунова (30) построена для уравнений движения генераторов без учета управлений.

Для оптимальной стабилизации необходимо обеспечить такой закон изменения u_{T_i} , при котором текущее значение мощности ΔP_{T_i} с минимальной ошибкой следует за оптимальным законом:

$$\Delta P_i^* = -\rho_i \cdot \text{sign} \left\{ \frac{dV}{ds_i} \right\} \quad (i = 1, \dots, n), \quad (31)$$

где ΔP_i^* – отклонение мощности турбины, обеспечивающее оптимальную стабилизацию движения.

Текущие значения мощности турбины и положения клапана представим в виде

$$\left. \begin{aligned} u_{T_i}^{(t)} &= u_{T_i}^* + \mu_i; \\ \Delta P_i^{(t)} &= \Delta P_i^* + \varepsilon_i; \\ i &= 1, \dots, n, \end{aligned} \right\} \quad (32)$$

где $u_{T_i}^*$ – положение клапана турбины, соответствующее оптимальному значению мощности турбины ΔP_i^* ; μ_i – отклонение текущего положения клапана турбины от оптимального $u_{T_i}^*$; ε_i – отклонение текущего значения мощности турбины от оптимального.

В качестве невозмущенного решения уравнения (28) будем рассматривать $\Delta P_i^*(t)$.

Из уравнения (28) можно получить соотношение

$$u_i^* = \Delta P_i^* + T_{si} \frac{d\Delta P_i^*}{dt}, \quad i = 1, \dots, n, \quad (33)$$

где

$$\Delta P^*_i = -\rho_i k_{pi} \frac{\partial V}{\partial s_i}, \quad i = 1, \dots, n. \quad (34)$$

С учетом уравнений (28), (32) и (33) запишем уравнение возмущенного движения

$$T_{si} \frac{d\varepsilon_i}{dt} = -\varepsilon_i + \mu_i, \quad i = 1, \dots, n. \quad (35)$$

В процессе управления следует выбирать такой закон изменения $\mu_i(t)$, чтобы отклонение текущего значения мощности турбины ε_i было минимальным.

Потребуем, чтобы при управлении обеспечивался минимум функционала, т.е.

$$R_i = \int_{t_0}^T (\varepsilon_i^2 + \mu_i^2) dt. \quad (36)$$

Критерий качества типа (36) обеспечивает минимизацию в течение переходного процесса величины ε_i при минимальных затратах на управление.

Выбор закона изменения $\mu_i(t)$, минимизирующего выражения (36), может быть проведен методом динамического программирования [3, 4].

Для этого составим систему основных функциональных уравнений Беллмана для оптимального движения системы (35), обеспечивающего минимум функционалу (36):

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon^2 + \mu^2 + (-\varepsilon + \mu) \frac{\partial \psi}{\partial \varepsilon} = 0; \\ 2\mu + \frac{\partial \psi}{\partial \varepsilon} = 0. \end{aligned} \right\} \quad (37)$$

Решение уравнений (37) будем искать в виде знакоопределенной положительной функции

$$\psi = A\varepsilon^2. \quad (38)$$

Исключая μ из первого уравнения (37), с учетом (38) имеем уравнения для определения неизвестного коэффициента:

$$A^2 + 2A - 1 = 0,$$

откуда $A_1 = (\sqrt{2} - 1)$; $A_2 = -(\sqrt{2} + 1)$.

Из второго уравнения (37) с учетом первого корня имеем

$$\mu = -(\sqrt{2} - 1)\varepsilon.$$

После решения основного функционального уравнения Беллмана имеем

$$\mu_i = -(\sqrt{2} - 1)\varepsilon_i. \quad (39)$$

С учетом выражений (10), (11) и (17) требуемый закон управления принимает вид

$$u_{Ti}^t = \Delta P_i^* + T_{si} \frac{d\Delta P_i^*}{dt} - 0,415(\Delta P_i^{(t)} - \Delta P_i^*), \quad i = 1, \dots, n. \quad (40)$$

Подставив в (40) выражение (34), получим

$$u_{Ti}^t = -k_{pi} \rho_i \left\{ (\sqrt{2} - 1) \Delta P_{Ti}(t) + T_{si} \cdot \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial V}{\partial s_i} \right) - \sqrt{2} \cdot T_{si} \left(\frac{\partial V}{\partial s_i} \right) \right\}. \quad (41)$$

Присутствие второго слагаемого в выражении (40) необходимо для компенсации запаздывания в изменении мощности (момента) турбины с эквивалентной постоянной времени T_{si} .

Как уже было указано выше, третье слагаемое обусловлено отклонением текущего значения мощности турбины от требуемого оптимального.

Следует отметить, что в случае представления модели паровой турбины последовательным соединением нескольких апериодических звеньев могут быть проведены аналогичные рассуждения. При этом возникает необходимость в последовательной минимизации нескольких функционалов типа (36).

Характерной особенностью предлагаемого закона регулирования является его зависимость от вида функции Ляпунова (41).

В проведенных расчетах функция Ляпунова представлялась в виде квадратичной формы. Например, при формировании закона (41) на основе функции Ляпунова $V = \frac{1}{2} \sum_i s_i^2$ он приобретает наиболее простой вид:

$$u_{Ti} = -k_{Pi} \cdot \rho_i \left\{ (\sqrt{2} - 1) \cdot \Delta P_{Ti}(t) - \sqrt{2} \cdot s_i(t) + T_{si} \cdot \frac{ds_i(t)}{dt} \right\}. \quad (42)$$

Такое представление функции Ляпунова, как показали расчеты, является приемлемым для синтеза системы управления энергосистемами и снимает ряд трудностей, связанных с ее построением. Ниже рассмотрен процесс регулирования турбины для одномашинной системы при $E' = \text{const}$. Параметры режима и схемы замещения приведены на рис. 1.

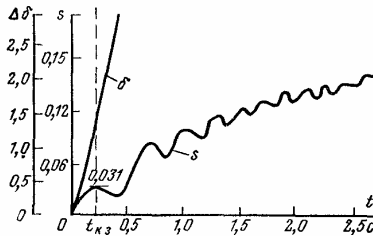


Рис. 4. Кривые изменения угла δ и скольжения s при трехфазном коротком замыкании длительностью $t_{к.з.} = 0,18$ с ($\Delta\delta$ – отклонение угла)

В качестве расчетного возмущения рассматривались трехфазные короткие замыкания на шинах станции длительностью $t_{к.з.} = 0,2$ и $0,3$ с. Без аварийного регулирования динамическая устойчивость нарушается при $t_{к.з.} = 0,18$ с (рис. 4).

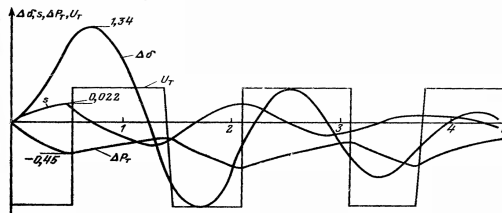


Рис. 5. Переходный процесс в регулируемой системе при $t_{к.з.} = 2$ с: $\Delta\delta$ – отклонение угла; s – скольжение; ΔP_T – отклонение мощности турбины; U_T – положение клапана

При действии аварийного регулирования по закону (18) удается сохранить динамическую устойчивость при времени короткого замыкания большем, чем предельное. На рис. 5 приведен процесс регулирования при $t_{к.з} = 0,2$ с.

Регулирование начинается с момента времени $t_{зан} = 0,02$ с. Перемещение клапана для набора нагрузки после сброса происходит до момента времени достижения углом своего максимального значения.

При коротком замыкании длительностью $t_{к.з} = 0,3$ с сохранить синхронную динамическую устойчивость не удается. Однако предлагаемый закон аварийного регулирования турбины улучшает условие синхронизации, которое наступает после трех асинхронных проворотов при $t = 9$ с (рис. 6).

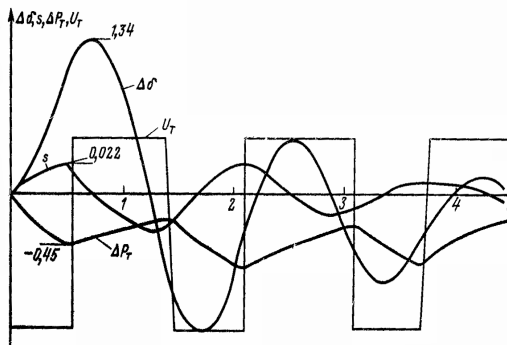


Рис. 6. Переходный процесс в регулируемой системе при $t_{к.з} = 0,3$ с

Расчеты показали значительное влияние на процесс регулирования эквивалентной постоянной времени T_s . Для выявления работоспособности алгоритма были проведены расчеты при искусственно уменьшенной постоянной времени. Для сравнения на рис. 7 приведен процесс управления при постоянной времени $T_s = 0,1$ с. При $t_{к.з} = 0,3$ с генератор не выпадает из синхронизма.

На рис. 8 приведен процесс регулирования в трехмашинной системе при длительности короткого замыкания $t_{к.з} = 0,7$ с. Аварийное регулирование осуществлялось на двух генераторах. Предельное время короткого замыкания в системе составляет $t_{к.з.р} = 0,52$ с.

Как видно из рис. 8, в энергосистеме наступает ресинхронизация к новому положению равновесия.

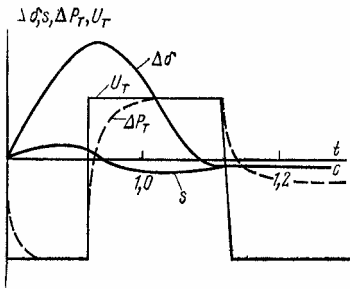


Рис. 7. Переходный процесс в регулируемой системе ($t_{к.с.} = 0,3$ с; $T_s = 0,1$ с)

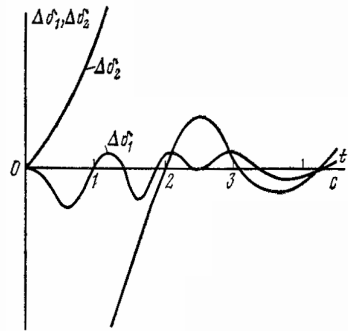


Рис. 8. Переходный процесс в регулируемой трехмашинной системе

Синтез законов аварийного управления мощностью гидротурбин (АУМГТ) высоконапорных ГЭС в сложной электроэнергетической системе. Рассмотрим способ повышения устойчивости параллельной работы высоконапорных гидроэлектростанций в сложной энергосистеме путем управления мощностью гидротурбин экстренным отводом воды (ЭОВ) из напорного трубопровода совместно с изменением открытия направляющего аппарата (НА) [7-9].

Для осуществления такого управления гидроагрегат должен быть снабжен ЭОВ из напорного водовода, например, типа холостого выпуска. Кроме того, система регулирования ЭОВ, а также регулятор скорости гидротурбины должны быть оборудованы электрогидравлическими преобразователями (ЭГП), позволяющими обеспечить быстрое действие сервоприводов ЭОВ и НА турбины.

Изменение мощности гидротурбины при подаче управления на вход ЭГП системы регулирования ЭОВ можно описать с помощью уравнений [7-9]:

$$\begin{cases} T_{S\mu_i} \frac{d\mu_i}{dt} = -\mu_i + u_{\mu_i}; \end{cases} \quad (43)$$

$$\begin{cases} T_{\mu_i} b_i \frac{d\Delta P_{T\mu_i}}{dt} = -\Delta P_{T\mu_i} - k_{D_i} \cdot 0,5 \cdot T_{\mu_i} \cdot \frac{d\mu_i}{dt}; \end{cases} \quad (44)$$

$$i = 1, 2, \dots, n,$$

где T_{μ_i} - постоянная инерции напорного трубопровода гидроагрегата;
 $\mu_i(t)$ - открытия регулирующего органа ЭОВ; ρ_{μ_i} - ход поршня серво-

мотора ЭОВ соответственно; $u_{\mu i}(t)$ - управляющий сигнал, поступающий на вход электроприставки к регулятору ЭОВ; $k_{Di} \cdot b_i$ - постоянные для данной гидротурбины и ЭОВ величины.

Применим тот же принцип формирования закона управления, что и для паровой турбины (24) - (41), только при этом вместо одного уравнения (28) будем рассматривать систему из двух дифференциальных уравнений (43) и (44), описывающих неминимально-фазовое звено второго порядка. Полученный выше закон (34) формируется применительно к изменению момента гидротурбины. Для получения закона управления $u_{\mu i}$ на входе управляющей системы ЭОВ с учетом (43) – (44) воспользуемся алгоритмом решения (31) - (40).

Применяя этот алгоритм (математические выкладки опускаем), можно получить закона управления $u_{\mu i}$ для ЭОВ:

$$u_{\mu i} = -k_{Pi} \frac{1}{k_{Di} \cdot 0,5 \cdot T_{ni}} \left\{ \sqrt{2} (T_{ni} \cdot b_i + T_{s\mu i}) \left(\frac{\partial V}{\partial s_i} \right) \right\} + 2 \int_0^t \left(\frac{\partial V}{\partial s_i} \right) dt +$$

$$+ T_{ni} \cdot b_i \cdot T_{s\mu i} \cdot \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial V}{\partial s_i} \right) + (\sqrt{2} - 1) (T_{ni} \cdot b_i - T_{s\mu i}) \Delta P_{T\mu i}(t) - 3 \int_0^t \Delta P_{T\mu i}(t) dt. \quad (45)$$

При очень большом коэффициенте k_{Pi} закон управления (45) можно представить в упрощенном виде

$$U_{\mu i} = -\rho_{ki} \cdot \text{sign} \left\{ \frac{\sqrt{2} (T_{ni} \cdot b_i + T_{s\mu i})}{k_{Di} \cdot 0,5 \cdot T_{ni}} \cdot \left(\frac{\partial V}{\partial s_i} \right) + \frac{2}{k_{Di} \cdot 0,5 \cdot T_{ni}} \times \right.$$

$$\left. \times \int_0^t \left(\frac{\partial V}{\partial s_i} \right) dt + \frac{T_{ni} \cdot b_i \cdot T_{s\mu i}}{k_{Di} \cdot 0,5 \cdot T_{ni}} \cdot \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial V}{\partial s_i} \right) \right\}. \quad (46)$$

Как видно из (45) и (46), полученные законы по отношению к $(\partial V/\partial s_i)$ являются пропорционально-интегриродифференциальными законами управления, принадлежат к классу кусочно-непрерывных ограниченных функций, а величина и смена процесса управляющих воздействий зависит от функции Ляпунова $V(x)$.

В табл. 3 приведены частные производные для некоторых функций Ляпунова, наиболее часто встречающихся в литературных источниках и наиболее просто описывающих сложные ЭЭС в консервативной идеализации.

Синтез систем аварийного управления мощностью турбины и возбуждением генератора с использованием метода функций Ляпунова

Таблица. 3. Частные производные для функций Ляпунова

Функция Ляпунова	Производная $\partial V/\partial s_i$
$V = \sum_i \sum_j V_{ij} x_i x_j$	$(\partial V/\partial s_i) = \sum_j V_{ij} x_j$
$V = \sum_i \left(\frac{I}{2} s_i^2 + \gamma_i s_i \Delta \delta_i + \Delta \delta_i^2 \right) + \int_0^{\Delta \delta} \Delta P_{Ti} d\delta_i$	$(\partial V/\partial s_i) = \gamma_i \Delta \delta_i + s_i$
$V = \sum_i \left(\frac{\beta_i}{2} s_i^2 + \alpha_i s_i \Delta P_{Ti} + \frac{\Delta P_{Ti}^2}{2} \right)$	$(\partial V/\partial s_i) = \beta_i s_i + \alpha_i \Delta P_{Ti} + \Delta P_{Ti} (\partial P_i/\partial s_i)$
$V = \sum_i \frac{I}{2} s_i^2$	$(\partial V/\partial s_i) = s_i$

При формировании закона (46) на основе функции Ляпунова вида $V = \frac{I}{2} \sum_i s_i^2$ он приобретает наиболее простой вид:

$$U_{\mu i} = -\rho_{ki} \cdot \text{sign} \left\{ \frac{2}{k_{Di} \cdot 0,5 \cdot T_{ni}} \cdot \delta_i(t) + \frac{\sqrt{2} (T_{ni} \cdot b_i + T_{s\mu i})}{k_{Di} \cdot 0,5 \cdot T_{ni}} \cdot s_i(t) + \frac{T_{ni} \cdot b_i \cdot T_{s\mu i}}{k_{Di} \cdot 0,5 \cdot T_{ni}} \cdot \frac{ds_i(t)}{dt} \right\}. \quad (47)$$

Ввиду того, что закон управления (46) зависит от функции Ляпунова $V(x)$, при ее построении необходимо учитывать возможность использования только местных параметров так, как это сделано в (47).

Расчеты показывают, что наиболее эффективно закон управления (45) работает в условиях, когда аварийное управление мощностью турбин применяется на всех гидро- и тепловых станциях ЭЭС и когда имеется достаточный резерв, позволяющий осуществлять набор мощности по отношению к ее рабочей величине. Если же таких условий нет, дефицитные части системы даже при наличии АУМТ могут оказаться в тяжелом положении из-за жестких ограничений по набору мощности, и в них неизбежно отключится нагрузка.

Такое ограничение снимается, если применить систему АУМГТ, работающую по закону (45), в которой использована функция Ляпунова, зависящая от взаимного угла и взаимного скольжения. Трудность реализации этого закона заключается в измерении взаимных режимных параметров.

Следует отметить, что АУМГТ с помощью ЭОВ обладает ограниченной мощностью и энергией стабилизации. Поэтому в “чистом” виде этот способ найдет лишь ограниченное применение ввиду того, что он основан на принципе управляемых гидроударных явлений в напорном водоводе с помощью отвода воды.

Этот способ приобретает универсальность, когда он применяется совместно с закрытием направляющего аппарата.

Прежде чем рассмотреть такое сочетание, рассмотрим возмущения, наиболее часто встречающиеся в ЭЭС и вызывающие динамические переходы.

Любое возмущение, будь то короткое замыкание или толчок нагрузки, отключение линии или потеря станции, можно рассматривать как нарушение баланса мощности на валах электрических машин. Возмущение может носить кратковременный характер, как при коротком замыкании и успешном АПВ, когда послеаварийный режим совпадает с доаварийным. В этом случае для сохранения динамической устойчивости можно использовать электрическое торможение или аварийное управление гидротурбин с помощью ЭОВ. При недостаточном уровне обеспеченности этими средствами как крайняя мера может быть использовано отключение генераторов и нагрузки.

Наряду с кратковременными возмущениями в ЭЭС имеют место аварии, приводящие к изменению послеаварийного режима, например, вследствие отключения линий, нагрузок, станций. Такие аварии вызывают длительно существующие дефициты и избытки мощности в отдельных частях системы. При этом наряду с сохранением динамической устойчивости возникает задача обеспечения статической устойчивости послеаварийного режима. В качестве основной меры воздействия на последнем этапе должны рассматриваться разгрузка турбин (гидро- и тепловых) и мобилизация резерва мощности, а в качестве дополнительных - отключение нагрузок по сигналам ПА или АЧР и деление системы. Именно для этого вида возмущений максимальный эффект дает сочетание АУМГТ с помощью ЭОВ с закрытием направляющего аппарата. Если АУМГТ с помощью ЭОВ оптимально демпфирует колебания и позволяет сохранить синхронную динамическую устойчивость, то закрытием направляющего аппарата ограничивается мощность гидротурбины до уровня статической устойчивости послеаварийного режима.

Многосвязное аварийное управление мощностью гидроагрегата (МАУМГТ) с помощью воздействия на ЭОВ и на направляющий аппарат турбины. При синтезе комплексной системы аварийного

управления мощностью гидроагрегата с помощью ЭОВ и направляющего аппарата турбины могут иметь место два случая [7-9].

Случай 1 - направляющий аппарат изменяет свое положение по заданной (дозированной) программе (система программного управления).

Случай 2 - изменение открытия направляющего аппарата происходит по принципу обратной связи.

Рассмотрим подробно эти два случая. При программном управлении направляющим аппаратом $\alpha(t)$ изменение мощности турбины $\Delta P_{T\alpha}(t)$ происходит также по программному закону $\Psi(t)$.

Обозначим их программную функциональную связь в виде

$$\Delta P_{T\alpha}(t) = \Psi(\alpha(t)). \quad (48)$$

Условно можно считать, что управляющий момент турбины ΔP_T^* в (42) состоит из воздействий разгружающих $\Delta P_{T\alpha}$ и демпфирующих $\Delta P_{T\mu}$, т.е.

$$\Delta P_{T_i}^* = \Delta P_{T\mu} + \Delta P_{T\alpha} + \varepsilon, \quad (48, a)$$

где ε - погрешность из-за инерционности и запаздывания системы.

В этом случае закон стабилизации для ЭОВ имеет вид

$$U_{\mu i} = -\rho_{\mu i} \cdot \text{sign} \left\{ \frac{\sqrt{2}(T_{ni} \cdot b_i + T_{s\mu i})}{k_{Di} \cdot 0,5 \cdot T_{ni}} \cdot \left[\Psi(t) + \frac{\partial V}{\partial s_i} \right] + \frac{2}{k_{Di} \cdot 0,5 \cdot T_{ni}} \times \right. \\ \left. \times \int_0^t \left(\Psi(t) + \frac{\partial V}{\partial s_i} \right) dt + \frac{T_{ni} \cdot b_i \cdot T_{s\mu i}}{k_{Di} \cdot 0,5 \cdot T_{ni}} \cdot \frac{d}{dt} \left(\Psi(t) + \frac{\partial V}{\partial s_i} \right) \right\}. \quad (49)$$

где $\Psi(t)$ - программное изменение мощности турбины закрытием направляющего аппарата.

В законе (49) ввиду присутствия слагаемых по $\Psi(t)$ наряду с $(\partial V/\partial s_i)$ выполняется условие двухканальности по Б.Н. Петрову [4], а следовательно, и условие по "ε" - инвариантности системы управления.

Для синтеза закона стабилизации по воздействию через направляющий аппарат воспользуемся уравнениями [7-9]

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{ni} B_i \frac{d\Delta P_{T\alpha i}(t)}{dt} + \Delta P_{T\alpha i}(t) = C_i \cdot \alpha_i(t) - C_i \cdot T_{ni} \cdot A_i \cdot \frac{d\alpha_i(t)}{dt}; \\ T_{s\alpha i} \frac{d\alpha_i(t)}{dt} = -\alpha_i(t) + U_{\alpha i}(t), \end{array} \right. \quad (50)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{s\alpha i} \frac{d\alpha_i(t)}{dt} = -\alpha_i(t) + U_{\alpha i}(t), \end{array} \right. \quad (51)$$

где A , B и C - постоянные для данной гидротурбины величины.

При автономной работе ЭОВ закон оптимальной стабилизации по НА имеет вид

$$U_{\alpha i} = -\rho_{\alpha i} \cdot \text{sign} \left\{ \frac{\sqrt{2}(b_{1i} + b_{2i})}{a} \cdot \left(\frac{\partial V}{\partial s_i} \right) + \frac{\sqrt{2}(\sqrt{2}a - b_{2i})}{a^2} e^{-\frac{t}{a}} \times \right. \\ \left. \times \int_0^t \left(\frac{\partial V}{\partial s_i} \right) e^{a dt} + \frac{b_{2i} \cdot b_{1i}}{a} \cdot \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial V}{\partial s_i} \right) \right\}. \quad (52)$$

При взаимосвязанной работе ЭОВ и НА турбины закон стабилизации (46) и (52) имеет вид

$$U_{\alpha i} = -\rho_{\alpha i} \cdot \text{sign} \left\{ \frac{\sqrt{2}(b_{1i} + b_{2i})}{a} \cdot \left(\Delta P_{T\mu i} + \frac{\partial V}{\partial s_i} \right) + \frac{\sqrt{2}(\sqrt{2}a - b_{2i})}{a^2} e^{-\frac{t}{a}} \cdot \right. \\ \left. \cdot \int_0^t \left(\Delta P_{T\mu i} + \frac{\partial V}{\partial s_i} \right) e^{a dt} + \frac{b_{2i} \cdot b_{1i}}{a} \cdot \frac{d}{dt} \left(\Delta P_{T\mu i} + \frac{\partial V}{\partial s_i} \right) \right\}; \quad (53)$$

$$U_{\mu i} = -\rho_{\mu i} \cdot \text{sign} \left\{ \frac{\sqrt{2}(T_{ni} \cdot b_i + T_{s\mu i})}{k_{Di} \cdot 0,5 \cdot T_{ni}} \cdot \left[\Delta P_{T\alpha i} + \frac{\partial V}{\partial s_i} \right] + \frac{2}{k_{Di} \cdot 0,5 \cdot T_{ni}} \times \right. \\ \left. \times \int_0^t \left(\Delta P_{T\alpha i} + \frac{\partial V}{\partial s_i} \right) dt + \frac{T_{ni} \cdot b_i \cdot T_{s\mu i}}{k_{Di} \cdot 0,5 \cdot T_{ni}} \cdot \frac{d}{dt} \left(\Delta P_{T\alpha i} + \frac{\partial V}{\partial s_i} \right) \right\}. \quad (54)$$

Как видим, законы (53) и (54) требуют введения перекрестных связей по мощностям $\Delta P_{T\mu i}$ и $\Delta P_{T\alpha i}$ соответственно.

Воспользовавшись методом обратного оператора, можно показать, что это условие можно заменить условием введения перекрестных связей по $\alpha(t)$ и $\mu(t)$ соответственно. Если измерение составляющих $\Delta P_{T\mu i}$ и $\Delta P_{T\alpha i}$ затруднительно, то измерение $\mu(t)$ и $\alpha(t)$, наоборот, не представляет трудностей.

Расчеты показывают высокую эффективность законов (53) и (54). Эти законы позволяют сохранить синхронную динамическую и результирующую устойчивость даже после трехфазных коротких замыканий и неуспешном АПВ в первом цикле.

Хотя первоначально закон (49) выводился для совместной работы ЭОВ и НА, он может быть использован и для описания совместной работы ЭОВ и электрического торможения агрегатов.

В этом случае, если торможение происходит непосредственно на шинах генераторов, в выражении (48, а) можно принять в первом приближении

$$\Delta P_{Ti}^* = \Delta P_{T\mu} + \Delta P_{T\alpha} + \Delta P_{ЭТ} + \varepsilon . \quad (55)$$

Тогда условием включения и отключения сопротивления может служить условие (41), т.е.

$$\Delta P_{ЭТ} = -\rho_{iЭТ} \cdot \text{sign} \left\{ \frac{\partial V}{\partial s_i} \right\} . \quad (56)$$

Если в качестве функции Ляпунова $V(x)$ взять квадратичную форму $V = \frac{1}{2} \sum_i s_i^2$, то на основе (56) можно записать условие включения сопротивления:

- при $\text{sign } s > 0$ - происходит включение;
- при $\text{sign } s \leq 0$ - происходит отключение.

Аналогично можно определить эффективные законы управления и для других средств ПАА.

Выводы

1. Рассмотренный метод синтеза законов оптимального управления на основе теории стабилизации движения с использованием функций Ляпунова позволяет аналитически определить законы управления различными энергетическими установками.

2. Показана пригодность предлагаемых законов управления различными электроэнергетическими установками для повышения динамической устойчивости и сохранения результирующей устойчивости энергосистемы.

3. Показана эффективность синтезированных законов управления, формируемых по местным сигналам, соответствующим активной мощности, ЭДС, углу и скольжению генератора и их первым производным.

Библиографический список

1. **Проблемы** управляемости ЕЭС России в условиях рынка энергии и развития международного энергетического сотрудничества / В.А. Коротков, Г.П. Кутовой, В.И. Решетов, М.Ш. Мисриханов, С.В. Смоловик // Повышение эффективности работы энергосистем: Тр. ИГЭУ. Вып.5. - Иваново, 2002.
2. **Системные** вопросы регулирования возбуждения генераторов в сложных энергообъединениях / А.Х. Есипович, Г.Н. Жененко, А.С. Зеккель, А.В. Черкасский. – Кishинёв: Штиинца, 1989. - 118 с.
3. **Малкин И.Г.** Теория устойчивости движения. М., Наука, 1966. - 496 с.
4. **Красовский А.А.** Системы автоматического управления полетом и их аналитическое конструирование. - М.: Наука, 1973.
5. **Коротков В.А.** Оптимальная стабилизация энергосистемы на основе функции Ляпунова // Режимы и устойчивость энергетических систем: Тр. СибНИИЭ. Вып. 26. - М.: Энергия, 1975 - С. 65-72.
6. **Путилова А.Т., Подшивалов В.И., Коротков В.А.** Исследование эффективности законов аварийного управления мощностью паровых турбин, полученных с использованием функций Ляпунова // Применение метода функций Ляпунова в энергетике. - Новосибирск, 1975. - С. 107–110.
7. **Мисриханов М.Ш.** Аналитическое конструирование комплексной системы адаптивного управления возбуждением генераторов и мощностью гидравлических и паровых турбин электростанций по критерию обобщенной работы. – Махачкала: Даг. ЦНТИ, 1979. - 104 с.
8. **Мисриханов М.Ш., Брискин Л.А.** Оптимальное аварийное управление мощностью гидроагрегата экстренным отводом воды и изменением открытия направляющего аппарата турбины // Докл. респ. науч.-техн. совещания «Повышение надежности объединенной энергосистемы Северного Казахстана». - Алма-Ата: Изд-во КазНИИНТИ, 1976. - С. 78-85.
9. **Мисриханов М.Ш., Тамадаев А.М.** Методика аварийного управления мощностью гидротурбины с помощью отвода воды в сочетании с направляющим аппаратом // Тез. докл. I-й науч.-техн. конф. молод. ученых и специалистов-энергетиков Киргизии. - Фрунзе: Минэнерго СССР, КирНИОЭ, 1976. - С. 119-125.