

УДК 681.5.015:303.092.5.621.311.631.11

П. Д. Лежнюк, д. т. н., проф.; А. Е. Рубаненко, к. т. н., доц.; О. И. Казьмирук**ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ НОРМАЛЬНЫМИ РЕЖИМАМИ ЭЭС
С УЧЕТОМ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ С
РПН**

Усовершенствован метод определения управляющих воздействий трансформаторов с РПН с учетом коэффициента качества их функционирования, использование которого позволяет оценить целесообразность осуществления управляющих воздействий и уменьшить расходы, обусловленные повреждением трансформаторов. Предложено при определении коэффициента качества трансформаторов с РПН учитывать техническое состояние системы охлаждения.

Ключевые слова: система охлаждения, силовой трансформатор, оптимальное управление, нормальные режимы, электроэнергетическая система.

Введение

Свойством современных ЭЭС, усложняющим процесс управления и значительно уменьшающим эффективность управляющих воздействий, является возрастание доли оборудования, отработавшего нормативный срок. В случае необходимости продления его эксплуатации, актуальной становится проблема определения текущего состояния и остаточного ресурса. Во многих странах мира, а среди них и в Украине, доля оборудования, отработавшего свой паспортный ресурс, превысила половину [1 – 2]. Поэтому признаком современности является повышение требований обеспечения безаварийной эксплуатации такого оборудования. Это вызвано снижением темпов создания нового оборудования, усилением мощности энергообъектов и усилением конкуренции между энергокомпаниями, обусловленной переходом к энергорынку.

Соответствие текущего и оптимального значений критерия оптимальности (потерь мощности) в ЭЭС достигается за счет повышения интенсивности работы регулирующих устройств (РУ). Это приводит к дополнительному срабатыванию их технического ресурса, снижению надежности функционирования, что, как следствие, приводит к отказам и убыткам, иногда соразмерным и даже большим технико-экономического эффекта, который достигается в результате оптимизации. Поэтому необходимо разрабатывать математические модели для оптимального управления нормальными режимами (НР) электроэнергетической системы с учетом технического состояния РУ. Это позволяет более эффективно использовать трансформаторы с РПН для уменьшения потерь электроэнергии при ее транспортировке.

Поэтому, исходя из всего вышеизложенного, цель исследования заключается в уменьшении потерь мощности в электроэнергетических системах за счет усовершенствования управления параметрами нормальных режимов с учетом регулирующей способности трансформаторов с РПН и их технического состояния.

Материал и результаты исследования. Оперативный персонал, формируя управляющие воздействия, учитывает техническое состояние электрооборудования. Выбор трансформатора, который лучше использовать для оптимального управления нормальными режимами ЭЭС, осуществляют, учитывая следующие условия: переключение желательно реализовать наиболее надежным трансформатором, потому что повреждения трансформатора при переключениях приводят к расходам на ремонт, которые могут значительно превысить убытки от работы энергосистемы в неоптимальном режиме в случае отказа от применения ненадежного трансформатора; использование при управлении

параметрами НР трансформатора, который (по сравнению с другими) находится в лучшем техническом состоянии, для обеспечения их оптимальных значений не всегда обеспечивает оптимальный режим работы, потому что трансформатор может быть нечувствителен к поддержанию режима в данный момент; расчетное количество переключений для поддержания оптимального режима (некоторые трансформаторы можно перевести в категорию оборудования с аварийно низким остаточным ресурсом, а для остальных трансформаторов – лишь незначительно уменьшает их ресурс).

Поэтому предлагается в качестве критерия выбора трансформатора, которым лучше осуществлять переключение, и выбора количества переключений использовать коэффициент качества функционирования. Коэффициент качества функционирования учитывает характеристики надежности трансформатора (в частности остаточный ресурс), нагрузку трансформатора и чувствительность изменения потерь мощности в ЭЭС к переключениям РПН именно этого трансформатора. Переключение нужно осуществлять таким трансформатором, у которого коэффициент качества функционирования наиболее высокий [2]. Выбрать подходящий трансформатор сложно, учитывая то, что необходимо минимизировать потери и обеспечить надежность работы РПН (уменьшить количество отказов в работе РПН).

Рассмотрим задачу нахождения коэффициента качества функционирования трансформатора в зависимости от его влияния на потери в энергосистеме и его остаточного ресурса. Коэффициент качества функционирования трансформатора является комплексным параметром, который учитывает не только возможность трансформатора превращать электроэнергию, а и возможность эффективно влиять на режим энергосистемы [3 – 4], и определяется выражением:

$$k_{\text{к.функ}} = (a_1 + a_2) \cdot k_{\text{рес.перек}} \cdot k_{\text{рес.охлаж}} \cdot k_{\text{ресл}} \cdot a_3 \cdot k_{\text{потерь}}, \quad (1)$$

где $k_{\text{потерь}}$ – коэффициент потерь активной мощности во время передачи электрической энергии по линиям электропередач; $k_{\text{рес.перек}}$ – коэффициент остаточного ресурса трансформатора по параметру количества переключений РПН; a_1, a_2, a_3 – весовые коэффициенты; $k_{\text{ресл}}$ – коэффициент остаточного ресурса по параметру «накопленный коммутлируемый ток»; ($k_{\text{рес.охлаж.}}$) – коэффициент остаточного ресурса системы охлаждения трансформатора.

Коэффициент потерь рассчитывают по выражению (2):

$$k_{\text{потерь}} = \frac{\Delta P_{\text{неопт}} - \Delta P_{\text{опт}}}{\Delta P_{\text{неопт}}}, \quad (2)$$

где $\Delta P_{\text{опт}}$ – оптимальное значение потерь активной мощности для текущего режима ЭЭС; $\Delta P_{\text{неопт}}$ – значение потерь активной мощности при отказе от переключений данным трансформатором.

Коэффициент остаточного ресурса по параметру «накопленный коммутлируемый ток» определяют по формуле (3):

$$k_{\text{ресл}} = \frac{I_{\text{нак.ост.}} - n \cdot I_{\text{ком.т.}}}{I_{\text{пред.нак.}}}, \quad (3)$$

где $I_{\text{нак.ост.}}$ – остаток накопленного РПН коммутированного тока определяют по формуле (4):

$$I_{\text{нак.ост.}} = I_{\text{пред.}} - I_{\text{нак.пот.}}, \quad (4)$$

где $I_{\text{ком. т}}$ – ток через РПН во время m -ного переключения, m – номер переключения, n –

количество нужных переключений для достижения оптимального режима, $I_{пред}$ – предельное значение накопленного РПН коммутированного тока (из технической документации на РПН).

Определяют коэффициент остаточного ресурса по параметру количества переключений РПН после i -той серии переключений по формуле (5):

$$k_{рес.перекл.i} = \frac{n_{ост\ i-1} - n_i}{n_{пред}}, \quad (5)$$

где $n_{ост\ i-1}$ – остаточное количество переключений РПН после $i-1$ -ой серии переключений, которое определяют по выражению (6)

$$n_{ост\ i-1} = n_{пред} - n_{до}, \quad (6)$$

где $n_{пред}$ – предельное количество переключений РПН (из технической документации на РПН); $n_{до}$ – количество переключений, выполненных РПН до $i-1$ -ой серии переключений; n_i – количество переключений во время i -той серии переключений.

Весовые коэффициенты определяют по выражениям (7 – 9):

$$a_1 = \frac{B_1}{B_{сум}}, \quad (7)$$

$$a_2 = \frac{B_2}{B_{сум}}, \quad (8)$$

$$a_3 = \frac{B_3}{B_{сум}}, \quad (9)$$

где B_1 , B_2 – стоимость потерянной электрической энергии в результате работы по ремонтной схеме и стоимость ремонта РПН трансформатора в случае его повреждения во время оперативных переключений соответственно.

А стоимость сверхурочных технических потерь мощности определяют по выражению (10):

$$B_3 = (\Delta P_{тек} - \Delta P_{норм}) \cdot \tau \cdot C, \quad (10)$$

где $\Delta P_{тек}$ – текущее значение потерь активной мощности; C – стоимость 1 кВт·час электроэнергии транспортируемого по сетям ЭЭС; τ – длительность периода между переключениями, часов; $\Delta P_{норм}$ – нормативное значение технических потерь мощности.

А суммарную стоимость электрической энергии ($B_{сум}$) определяют по выражению (11):

$$B_{сум} = B_1 + B_2 + B_3, \quad (11)$$

Коэффициент остаточного ресурса ($k_{рес.охл.i,j}$) одного j -того охладителя, который изменяется в процессе эксплуатации от 1 до 0 о. е. для одного охладителя, определяют по выражению (12):

$$k_{рес.охл.i,j} = \frac{\Delta t_{тек\ j,i}}{\Delta t_{испр\ j,i}}, \quad (12)$$

где i – это номер режима нагрузки (i -той серии переключений РПН), $k_{рес.охл.i,j}$ зависит от разницы температур трансформаторного масла перед и после охладителя, $\Delta t_{тек\ j,i}$ – текущее значение разницы температур для i -того режима j -того охладителя, $\Delta t_{испр\ j,i}$ – значение разницы температур исправного трансформатора для i -того режима j -того охладителя

Используют общий коэффициент остаточного ресурса всех охладителей, который рассчитывают по выражению (13):

$$k_{\text{рес.охл}} = \sum_{i=1}^n \lambda \cdot k_{\text{рес } i, j}, \quad (13)$$

где $\lambda = 1/\Omega$ – коэффициент, учитывающий влияние каждого охладителя на коэффициент общего остаточного ресурса системы охлаждения; Ω – количество охладителей (ухудшение состояния одного охладителя на другой не влияет).

Далее формируют регулирующий сигнал на РПН трансформатора, пропорциональный к отклонению текущих суммарных потерь мощности в электроэнергетической системе от их оптимальных значений, согласовывают сформированный сигнал с сигналом, который учитывает ограничения: по напряжению; по частоте; по максимальному допустимому току линий электропередач; по зоне нечувствительности регулятора под напряжением; по нормируемым общесистемным потерям электрической мощности в линиях электропередач; по результатам согласования; при необходимости корректируют ранее сформированный регулирующий сигнал, который передают на привод РПН трансформатора [5]. На рис. 1 показана функциональная схема автоматизированной системы регулирования режима электроэнергетической системы [6].

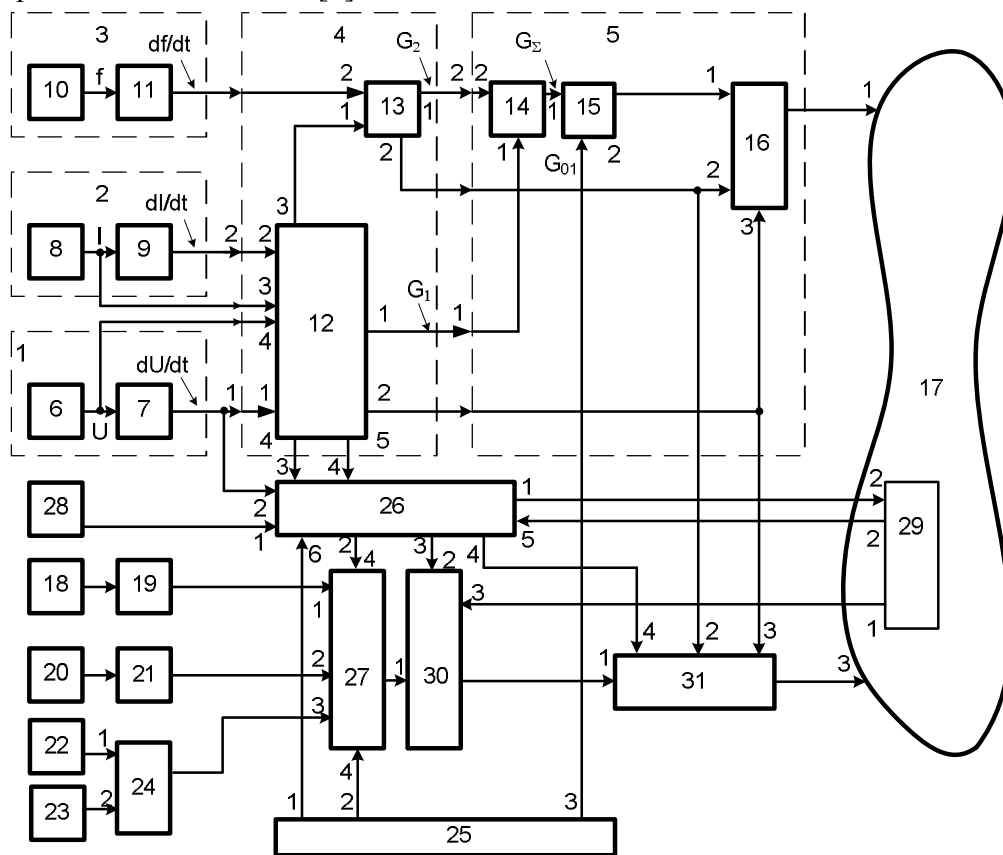


Рис. 1. Схема автоматизированной системы оптимального управления параметрами НР ЭЭС

Алгоритм работы системы оптимального управления параметрами НР ЭЭС с учетом технического состояния системы охлаждения трансформатора

При определении скорости отклонения напряжения в блоке определения скорости отклонения напряжения 1 сигнал с измерительного органа напряжения 6 поступает к дифференциальному органу напряжения 7, выходной сигнал которого пропорционален скорости изменения напряжения в контролируемых узлах системы. Для определения скорости отклонения тока в блоке определения скорости отклонения тока 2 сигнал с

измерительного органа тока 8 поступает к дифференциальному органу тока 9, выходной сигнал которого пропорционален скорости изменения тока в контролируемых сечениях системы.

Скорость отклонения частоты (в блоке определения скорости отклонения частоты 3) определяют с учетом сигнала, поступающего из измерительного органа частоты 10 к дифференциальному органу частоты 11, выходной сигнал которого пропорционален скорости изменения частоты в системе. Выходные сигналы из дифференциального органа напряжения 7 и дифференциального органа тока 9 подаются соответственно на первый и второй входы блока 4 определения чувствительности режима электрической сети к внешним возмущениям, где на первом выходе первого вычислительного блока 12 формируется выходной сигнал, пропорциональный убыткам от отклонения перетоков мощностей по контролируемым сечениям от их оптимальных значений. В первом вычислительном блоке 12 вычисляют скорость изменения мощности в линиях электропередач, определяют перетоки мощности в каждой из линий, мощность узловой нагрузки, частичную производную $\left[\frac{dU}{dS} \right]$, что соответствует зависимости изменения напряжения от изменения узловой мощности. Эти параметры используют при формировании выходного сигнала, пропорционального убыткам от отклонения перетоков мощностей по контролируемым сечениям от их оптимальных значений.

На втором выходе первого вычислительного блока 12 формируют сигнал о наличии превышения мощности, которая передается по линиям электропередач над максимальным допустимым значением. На третьем выходе первого вычислительного блока 12 формируют сигнал, пропорциональный скорости изменения узловой нагрузки.

Сигналы с выхода дифференциального органа частоты 11 блока 3 определения скорости отклонения частоты и сигнал с третьего выхода первого вычислительного блока 12 поступают соответственно на второй и первый входы второго вычислительного блока 13, в котором определяют скорость изменения частоты в системе $\frac{df}{dS}$ и сравнивают отклонения текущего значения частоты от номинального значения частоты.

На первом выходе второго вычислительного блока 13 формируется сигнал, пропорциональный экономическому ущербу от отклонения величины частоты, а на втором выходе формируется сигнал о наличии отклонения величины частоты от максимального значения такого отклонения.

В сумматоре 14 блока 5 формирование сигналов управления режимом работы электроэнергетической системы добавляют сигнал с первого выхода первого вычислительного блока 12 к сигналу с первого выхода второго вычислительного блока 13, которые поступают, соответственно, на первый и второй входы сумматора 14. Сигнал с первого выхода первого вычислительного блока 12 пропорциональный убыткам от отклонения перетоков мощности по контролируемым сечениям. А сигнал с первого выхода второго вычислительного блока 13 пропорционален экономическому ущербу от отклонения величины частоты от максимально допустимого значения такого отклонения.

Сигнал (G) с выхода сумматора 14 передается на первый вход органа сравнения 15, в котором его сравнивают с сигналом (G_0), пропорциональным величине экономически обоснованных убытков, который является уставкой регулирования. Сигнал G_0 поступает на второй вход органа сравнения 15 из ПЭВМ во время периодического программирования органа сравнения 15 и сохраняется в памяти блока сравнения 15. При выполнении условия $G \geq G_0$ сигнал с выхода блока сравнения 15 подается на первый вход органа управления 16. На третий вход органа управления 16 подается сигнал о наличии превышения мощности со второго выхода первого вычислительного блока 12, а на второй вход органа управления 16

подается сигнал о наличии отклонения величины частоты от максимального значения такого отклонения с другого выхода второго вычислительного блока 13. С учетом сигналов на входах органа управления 16 формируется сигнал на его выходе.

С выхода органа управления 16 сигнал в виде регулирующих воздействий подается на первый вход электроэнергетической системы 17, а именно, на исполнительные органы электроэнергетической системы 17 (например, на приводы высоковольтных выключателей), которые отвечают за изменение режима работы и структуры ЭЭС, например, путем включения резервной линии электропередач.

Также с помощью сенсора накопленного тока 18 электрического двигателя измеряют ток электрического двигателя привода РПН (измеряют сразу по окончании протекания пускового тока, при условии, что ток установившегося режима не превышает погрешности средств его контроля).

Определяют коэффициент остаточного ресурса по параметру «накопленный коммутуемый ток» привода РПН, и тем самым контролируют, не превышает ли ток двигателя заданное значение. Для этого на вход третьего вычислительного блока 19, в котором вычисляют значение коэффициента остаточного ресурса по параметру «накопленный коммутуемый ток» привода РПН, поступает сигнал с выхода сенсора тока 18 электрического двигателя, который установлен в шкафу управления РПН.

С выхода третьего вычислительного блока 19 сигнал, пропорциональный коэффициенту остаточного ресурса по параметру «накопленный коммутуемый ток», подается на первый вход седьмого блока вычислений 27, в котором вычисляют значение коэффициента качества функционирования РПН.

Коэффициент остаточного ресурса по параметру «накопленный коммутуемый ток» вычисляют по формуле (3).

Коэффициент остаточного ресурса по параметру «количество переключений» определяют в четвертом вычислительном блоке 21. Измеряют количество переключений РПН для каждого трансформатора с помощью сенсора количества переключений РПН 20, который установлен в шкафу управления РПН. Определяют коэффициент остаточного ресурса по параметру «количество переключений» для каждого трансформатора. Для этого на вход четвертого вычислительного блока 21 передают сигнал с выхода сенсора количества переключений РПН 20. С выхода четвертого вычислительного блока 21 сигнал, пропорциональный коэффициенту остаточного ресурса по параметру «количество переключений», подают на второй вход седьмого блока вычислений 27.

Коэффициент остаточного ресурса по параметру «количество переключений» вычисляют по формуле (5).

Определяют коэффициент остаточного ресурса по параметру «разница температур между входом и выходом охладителя» в пятом вычислительном блоке 24. Для этого на первый вход пятого вычислительного блока 24 передают сигнал с выхода сенсора температуры на входе охладителя 22; на второй вход пятого вычислительного блока 24 передают сигнал с выхода сенсора температуры на выходе охладителя 23. Коэффициент остаточного ресурса по параметру «разница температур трансформаторного масла перед и после охладителя» вычисляют по формуле (12).

В шестом блоке вычисления 26 воздействия переключений РПН вычисляют общесистемные потери мощности в линиях электропередач, оптимальное количество переключений, коэффициент влияния переключения РПН контролируемым z -тым трансформатором (где z – номер трансформатора) на общесистемные потери мощности с учетом ограничений: по напряжениям в узлах, по токам в ветвях, по крайним положениям избирателя РПН и по зоне нечувствительности РПН. Ограничения задают и корректируют в шестом блоке вычисления 26 при помощи сигнала, который подают с первого выхода переносной персональной электронной вычислительной машины 25 на шестой вход пятого

блока вычисления 26.

Сигнал с измерительного органа напряжения 6 и сигнал с измерительного органа тока 8 также подают соответственно на третий и четвертый входы первого. С четвертого и пятого выходов блока 12 сигналы передают соответственно на третий и четвертый входы шестого блока вычислений 26 влияния переключений РПН. С другого выхода этого блока сигнал, пропорциональный коэффициенту влияния переключения РПН контролируемого трансформатора, подают на пятый вход седьмого блока вычислений 27 коэффициента качества функционирования. Сигнал с четвертого выхода блока 12 пропорциональный нагрузке подстанции. Сигнал с пятого выхода блока 12 пропорциональный мощности, которая передается по линиям электропередач подстанции.

На первый вход шестого блока вычисления 26 воздействия переключений РПН подают сигнал с выхода сенсора положения привода РПН 28, который соответствует номеру ступени регулирования. На второй вход шестого блока вычисления 26 воздействия переключений РПН подают сигнал с выхода измерительного органа напряжения 6. На пятый вход шестого блока вычисления 26 воздействия переключений РПН подают сигнал со второго выхода оперативно-информационного комплекса электроэнергетической системы 29. Этот сигнал несет информацию о мощности в ветвях и узлах схемы электроэнергетической системы. С первого выхода шестого блока вычисления 26 подают сигнал на второй вход оперативно-информационного комплекса 29 электроэнергетической системы 17. Этот сигнал несет информацию о мощности нагрузки и веток контролируемой подстанции. Коэффициент влияния РПН z -того трансформатора на общесистемные потери ($k_{возд\ m,i}$) находят по выражению:

$$k_{возд\ m,i} = \frac{\Delta P_{неисп\ i} - \Delta P_{опт\ i}}{\Delta P_{неисп\ i}},$$

где $\Delta P_{неисп\ i}$ – общесистемные потери мощности в линиях электропередач вследствие неиспользования переключения РПН z -того трансформатора, $\Delta P_{опт\ i}$ – общесистемные потери мощности в линиях электропередач вследствие использования РПН z -того трансформатора с целью установления оптимального положения РПН с учетом ограничений по напряжению в узлах, по токам в ветвях и по крайним положениям РПН.

С выхода третьего вычислительного блока 19 сигнал подают на первый вход седьмого вычислительного блока 27, в котором определяют значение коэффициента качества функционирования трансформатора.

С выхода четвертого вычислительного блока 21 сигнал подают на второй вход седьмого вычислительного блока 27, в котором определяют значение коэффициента качества функционирования трансформатора.

С выхода пятого вычислительного блока 24 сигнал подают на второй вход седьмого вычислительного блока 27, в котором определяют значение коэффициента качества функционирования трансформатора.

Со второго выхода шестого вычислительного блока 26 сигнал подают на пятый вход седьмого вычислительного блока 27. Этот сигнал несет информацию о значении коэффициента влияния переключения РПН контролируемым z -тым трансформатором на общесистемные потери мощности.

Определяют коэффициент качества функционирования трансформатора с учетом коэффициента остаточного ресурса РПН по параметру «накопленный коммутлируемый ток», коэффициента остаточного ресурса РПН по параметру «количество переключений», коэффициента остаточного ресурса РПН по параметру «разница температур между входом и выходом охладителя», коэффициента влияния переключения РПН z -тым трансформатором на общесистемные потери мощности, стоимость потерянной электроэнергии в результате

работы по ремонтной схеме, стоимость ремонта РПН трансформатора в случае его повреждения при оперативных переключениях, стоимость сверхнормируемых технических потерь мощности.

Информацию о стоимости потерянной электроэнергии в результате работы по ремонтной схеме, стоимости ремонта РПН трансформатора в случае его повреждения при оперативных переключениях, стоимости сверхнормируемых технических потерь мощности подают со второго выхода переносной персональной электронной вычислительной машины на четвертый вход седьмого вычислительного блока 27.

С первого выхода оперативно-информационного комплекса электроэнергетической системы 29 подают сигнал об изменении активной мощности в узлах на восьмой вычислительный блок 30.

Далее из вычислительного блока 30 подают сигнал на первый вход блока 31. Далее определяют трансформатор, которым нужно осуществлять корректирующее влияние, по большему значению коэффициента качества функционирования. Для этого сигнал с четвертого выхода шестого блока вычислений 26 подают на четвертый вход блока выбора трансформатора 31 автоматизированной системы управления параметрами нормального режима электроэнергетической системы. На третий вход блока выбора трансформатора 30 поступает сигнал с первого выхода оперативно-информационного комплекса 29 электроэнергетической системы 17. Этот сигнал несет информацию о коэффициентах качества функционирования других трансформаторов электроэнергетической системы. В блоке выбора трансформатора 30 осуществляется ранжирование трансформаторов в соответствии со значениями коэффициента качества функционирования.

По результатам ранжирования выбирают трансформатор с большим значением коэффициента качества функционирования.

Далее формируют регулирующий сигнал на РПН выбранного трансформатора пропорционально отклонению текущих суммарных потерь мощности в ЭЭС от их оптимальных значений с учетом значения коэффициента качества функционирования трансформатора для текущего режима; сигнала о наличии превышения мощности, которая передается по линиям электропередач над максимальным допустимым значением мощности этих линий. Для этого сигнал с выхода блока выбора трансформатора 30 подают на первый вход формирователя сигнала на РПН трансформатора 31, с выхода которого сигнал подают на третий вход электроэнергетической системы 17, а именно, на привод РПН выбранного трансформатора электроэнергетической системы 17.

На четвертый вход формирователя сигнала на РПН трансформатора 31 подают сигнал о количестве переключений РПН выбранного трансформатора с четвертого выхода шестого вычислительного блока 26, а на второй и третий входы формирователя сигнала на РПН трансформатора 29 подают сигналы из других выходов: соответственно первого вычислительного блока 12 и второго вычислительного блока 13. Эти сигналы блокируют формирование сигнала на выходе формирователя сигнала на РПН трансформатора 31 в аварийном режиме работы электроэнергетической системы.

Выводы

Усовершенствование метода определения управляющих влияний трансформаторами РПН на нормальные режимы ЭЭС оправдано проводить с учетом технического состояния системы охлаждения, что позволит повысить качество функционирования и надежность этих трансформаторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кириленко О. В. Інформатизація та інтелектуалізація систем керування в електроенергетиці: деякі підсумки за останні роки / О. В. Кириленко, А. В. Праховник // Технічна електродинаміка: спеціальний випуск. – 2010. – С. 10 – 17.
- Наукові праці ВНТУ, 2012, № 4

2. Алексеев Б. А. Контроль состояния (диагностика) крупных силовых трансформаторов / Б. А. Алексеев. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2002. – 216 с.
3. Рубаненко О. Є. Контроль та покращення навантажувальної здатності трансформатора / О. Є. Рубаненко, О. І. Казмирук // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2011. – № 6 – С. 63 – 68.
4. Лежнюк П. Д. Оперативне діагностування трансформаторів в задачах оптимального керування / П. Д. Лежнюк, О. О. Рубаненко // Вісник Хмельницького національного технічного університету. – 2007. – № 2. – С. 185 – 189.
5. Лежнюк П. Д. Оптимальне керування нормальними режимами електроенергетичних систем критеріальним методом з урахуванням планового значення технічних втрат потужності / П. Д. Лежнюк, О. О. Рубаненко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2011. – № 1. – С. 86 – 90.
6. Пат. 61058 Україна, МПК⁸ Н О2 J 3/24. Спосіб оптимального керування нормальними режимами електроенергетичної системи / П. Д. Лежнюк, О. О. Рубаненко; заявник і патентоутримувач Вінницький національний технічний університет. – № u201014272. – заявл. 29.11.10 ; опубл. 11.07.11. Бюл. № 13, 2011 р.

Лежнюк Петр Демьянович – д. т. н., профессор, заведующий кафедрой электрических станций и систем.

Рубаненко Александр Евгеньевич – к. т. н., доцент кафедры электрических станций и систем.

Казмирук Олег Иванович – ассистент кафедры электрических станций и систем.
Винницкий национальный технический университет.