

## АВТОМАТИЗАЦИЯ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПОТОКАМИ МОЩНОСТИ В ЭЭС С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОДОБИЯ

Лежнюк П.Д., Кравцов К.И., Кулик В.В., Никиторович А.В.  
Винницкий государственный технический университет

Принимая во внимание сложность электроэнергетической системы (ЭЭС), как объекта управления, а так же ее особенности режимного характера, очевидно, что отслеживать и изменять оптимальные значения параметров в соответствии с состояниями ЭЭС возможно только с помощью систем автоматического управления (САУ) соответствующими регулирующими устройствами (РУ). В данной работе рассматривается функционирование САУ потоками мощности и напряжением в составе системы оптимального управления нормальными режимами ЭЭС с имитационной моделью. При этом используется подобие оптимальных режимов ЭЭС и критериальные соотношения между их параметрами [1, 2]

Действие рассматриваемых здесь САУ трансформаторами связи, которые объединяют электрические сети разных напряжений в электрическую систему, направлено на уменьшение потерь электроэнергии при ее транспортировке в ЭЭС путем перераспределения естественных потоков мощности и принудительного приближения их к потокораспределению, соответствующему однородной ЭЭС. Эта задача может быть отнесена к классу задач теории управления динамическими системами с квадратичным критерием оптимальности (например, потери активной мощности):

минимизировать

$$F(u) = \int_{t_0}^{t_k} [x_t(t)Lx(t) + u_t(t)Mu(t)]dt \quad (1)$$

в пространстве состояний

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= Ax(t) + Bu(t); & x(t_0) &= x_0; \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t), \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где  $x(t)$ ,  $u(t)$ ,  $y(t)$  – соответственно, векторы состояния, управления и наблюдения;  $L$ ,  $M$ ,  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  – матрицы постоянных коэффициентов;  $t_0$ ,  $t_k$  – начало и конец интервала времени;  $x_0$  – начальное значение вектора состояния.

В данной модели

$$u(t) = \begin{bmatrix} \dot{k}(t) \\ Q(t) \end{bmatrix}; \quad y(t) = \begin{bmatrix} \dot{S}_B(t) \\ \dot{I}_B(t) \\ \dot{U}(t) \end{bmatrix},$$

где  $\dot{k}(t)$  – вектор комплексных коэффициентов трансформации трансформаторов;  $Q(t)$  – вектор нагрузки источников реактивной мощности (ИРМ);  $\dot{S}_B(t)$ ,  $\dot{I}_B(t)$  – векторы мощностей и токов в ветвях ЭЭС, где осуществляются телеизмерения;  $\dot{U}(t)$  – вектор напряжений в узлах.

Первое уравнение в (2) является уравнением состояния системы, решение которого удовлетворяет начальному условию  $x_0 = x(t_0)$  и дает вектор состояния  $x(t) = \psi[x(t_0), u(t)]$ . Второе уравнение в (2) определяет исходные параметры в зависимости от  $x(t)$  и  $u(t)$ .

Задача оптимального управления потоками мощности в ЭЭС состоит в том, чтобы поддерживать значение  $F^*$  в заданной зоне нечувствительности  $\delta F^*$ . Для этого при выходе из нее осуществляются управляющие воздействия с помощью регулируемых трансформаторов, а

также ИРМ. Для повышения эффективности управление потоками мощности в ЭЭС с целью уменьшения потерь мощности необходимо выявлять реальные возможности трансформаторов с РПН, оценивая чувствительность потерь мощности к изменениям коэффициентов трансформации [3]. Для повышения эффективности использования трансформаторов с РПН в ЭЭС при формировании управляющих воздействий необходимо также учитывать их техническое состояние и остаточный ресурс. С учетом сказанного в задаче оптимизации режимов ЭЭС может быть установлен следующий критерий оптимальности [4]:

$$F = \Delta P + P(\delta U) + P(\omega) + \sum_{i=1}^q \text{Ш}_{T_i},$$

где  $\Delta P$  – суммарные потери активной мощности в ЭЭС;  $P(\delta U)$  – мощность, эквивалентная ущербу потребителей, обусловленному низким качеством напряжения;  $P(\omega)$  – мощность, эквивалентная ущербу вследствие недоотпуска электроэнергии, вызванного отказами трансформаторов, в частности отказами устройств РПН;  $\text{Ш}_{T_i}$  – штрафная функция, которая вводится для учета ресурса трансформаторов, в том числе переключений устройств РПН;  $q$  – количество регулируемых трансформаторов.

Решение задачи (1)-(2) сводится к реализации закона оптимального управления:

$$\mathbf{u}(t) = -\mathbf{w} \mathbf{y}(t), \quad (3)$$

$$\mathbf{r}_i = \begin{cases} +\Delta u_{\text{уст } i} & \text{при } u_i \geq u_i^+; \\ 0 & \text{при } u_i^+ > u_i > u_i^-; \\ -\Delta u_{\text{уст } i} & \text{при } u_i \leq u_i^-, \end{cases} \quad (4)$$

где  $\mathbf{w}$  – матрица обратной связи;  $\mathbf{r}$  – корректирующие воздействия САУ, которые вводят систему в область оптимальности (нечувствительности);  $\Delta u_{\text{уст } i}$  – добавка, которая, прибавляясь к уставке  $u_{\text{уст } i}$ , вызывает соответствующие действия РУ по введению управляемого параметра в область оптимальности;  $u_i$  –  $i$ -тая составляющая вектора управления;  $u_i^+, u_i^-$  – верхняя и нижняя границы зоны нечувствительности изменения  $u_i$ .

Оптимальное управление в соответствии с (2)-(3) требует определения границ зоны бесчувственности  $u_i^+$  та  $u_i^-$ , которое связано с необходимостью решения обратной задачи чувствительности [5]. Для ЭЭС эта задача особенно сложна из-за отсутствия аналитического выражения целевой функции, а также из-за необходимости поиска ее экстремума. Для решения данной задачи целесообразно применить критериальный метод.

В критериальной форме все параметры представляются в относительных единицах. В соответствии с этим, закон оптимального управления (3)-(4) запишется:

$$\mathbf{u}_*(t) = -\boldsymbol{\pi} \mathbf{y}_*(t), \quad (5)$$

$$\mathbf{r}_{*i} = \begin{cases} +\Delta u_{*\text{уст } i} & \text{при } u_{*i} \geq u_{*i}^+; \\ 0 & \text{при } u_{*i}^+ > u_{*i} > u_{*i}^-; \\ -\Delta u_{*\text{уст } i} & \text{при } u_{*i} \leq u_{*i}^-, \end{cases} \quad (6)$$

где  $\boldsymbol{\pi}$  – по своей сущности является матрицей критериев подобия, как показано в [2];  $u_{*i} = u_i / u_{i0}$  – параметры РУ, с помощью которых оптимизируются режимы ЭЭС, в относительных единицах (за базисные принимаются оптимальные значения параметров  $u_{i0}$ ). Все другие величины в (5)-(6) переводятся в относительные по аналогичной схеме.

В такой постановке задачи управляющими переменными являются э.д.с., которые необходимо ввести с помощью коэффициентов трансформации трансформаторов с РПН и ВДТ во все замкнутые контуры для реализации оптимального токораспределения, и мощности ИРМ. В [2] показано, что оптимальное значение потерь в ЭЭС достигается при относительных значениях э.д.с., определяемых по формулам:

$$\mathbf{E}_{*_{ypa}}^E(t) = \boldsymbol{\pi}_a^E \mathbf{J}(t), \quad \mathbf{E}_{*_{ypp}}^E(t) = \boldsymbol{\pi}_p^E \mathbf{J}(t), \quad (7)$$

где  $\mathbf{E}_{*_{ypa}}^E(t)$ ,  $\mathbf{E}_{*_{ypp}}^E(t)$  – векторы активных и реактивных составляющих относительных значений уравнительных э.д.с.;  $\mathbf{J}_a(t)$ ,  $\mathbf{J}_p(t)$  – векторы активных и реактивных составляющих относительных значений токов в узлах;  $\boldsymbol{\pi}_a^E$ ,  $\boldsymbol{\pi}_p^E$  – матрицы критериев подобия оптимальных контурных э.д.с.

Матрицы критериев подобия определяются по формулам [2]:

$$\boldsymbol{\pi}_a^E = -[\mathbf{E}_{ypa}^{(6)}]_d^{-1} \mathbf{v} \mathbf{r}_v \mathbf{M}_\alpha^{-1} [\mathbf{J}_p^6]_d; \quad \boldsymbol{\pi}_p^E = [\mathbf{E}_{ypp}^6]_d^{-1} \mathbf{v} \mathbf{r}_v \mathbf{M}_\alpha^{-1} [\mathbf{J}_a^6]_d, \quad (8)$$

где  $\mathbf{v} = \mathbf{N}_\alpha \mathbf{x}_{v\alpha} \mathbf{r}_{v\alpha}^{-1} - \mathbf{x}_k \mathbf{r}_k^{-1} \mathbf{N}_\alpha$  – матрица системных показателей неоднородности ЭЭС;  $\mathbf{r}_v$ ,  $\mathbf{x}_v$  – диагональные матрицы сопротивлений ветвей;  $\mathbf{r}_k$ ,  $\mathbf{x}_k$  – диагональные матрицы сопротивлений контуров;  $\mathbf{M}_\alpha$ ,  $\mathbf{N}_\alpha$  – матрицы соединений ветвей в узлах и контурах дерева схемы.

Метризация множества  $\{\mathbf{v}\}$  позволяет количественно определить величину неоднородности ЭЭС как среднегеометрическое расстояние между векторами неоднородности ветвей, разнесенной по контурам ЭЭС, и неоднородности контуров, распределенной по ветвям ЭЭС. Это расстояние может быть определено через евклидовую норму матрицы  $\mathbf{v}$ :

$$d_v = \rho(\mathbf{N}_\alpha \mathbf{x}_{v\alpha} \mathbf{r}_{v\alpha}^{-1}; \mathbf{x}_k \mathbf{r}_k^{-1} \mathbf{N}_\alpha) = \|\mathbf{v}\|_e = [\text{tr}(\mathbf{v} \mathbf{v}_t)]^{1/2},$$

и является обобщенным показателем неоднородности ЭЭС. Он используется для оценки целесообразности и эффективности оптимального управления потоками мощности в ЭЭС. По его значению определяются системы, где в первую очередь с технической точки зрения наиболее целесообразно создание САУ.

С учетом связи между контурными э.д.с. и коэффициентами трансформации трансформаторов (7) при определенных условиях (трансформаторы находятся в хордах базовой системы контуров, количество регулируемых трансформаторов соответствует количеству независимых контуров) могут быть записаны в виде [2]:

$$\mathbf{k}(t) = 1 - \boldsymbol{\pi}_a^E \mathbf{J}(t), \quad \mathbf{k}'(t) = -\boldsymbol{\pi}_p^E \mathbf{J}(t), \quad (9)$$

где  $\mathbf{k}'(t)$ ,  $\mathbf{k}''(t)$  – векторы действительных и мнимых составляющих коэффициентов трансформации трансформаторов.

Среди возможных способов реализации соответствующей САУ предпочтение отдается адаптивному регулированию с эталонной моделью. Такой подход отвечает требованиям к управлению нормальными режимами ЭЭС, в его рамках могут применяться наработанные и используемые на сегодня в АСДУ алгоритмы и программы. Он довольно просто реализуется на практике с помощью современных микропроцессорных систем.

Структурная схема оптимального управления потоками мощности в ЭЭС на основе подобия оптимальных режимов приведена на рис. 1.

Данная схема управления состоит из двух контуров. В первом контуре (главном) осуществляется автоматическое управление отдельными РУ с помощью устройств автоматического контроля и управление функционированием (АКУФ) РУ. Они функционируют по законам управления (9). Векторы наблюдения  $\mathbf{y}'$  для управления РУ формируются на основе телеизмерений в выделенной области коррекции, в которой обеспечивается частичная или полная наблюдаемость.

Во втором контуре (адаптации) в зависимости от степени нарушения режима ЭЭС и решений диспетчера может выполняться перенастройка АКУФ РУ или прямое управление параметрами РУ. В последнем случае устройства АКУФ РУ используются для согласования канала телемеханики и схемы управления РУ. Команды диспетчера по изменению коэффициентов трансформации реализуются путем соответствующего изменения составляющих

вектора корректирующих воздействий  $\mathbf{r}$ . В случае, если оптимальное управление осуществляется автоматически, в контуре адаптации по полной информации о состоянии ЭЭС  $\mathbf{y}$  определяются матрицы критериев подобия  $\pi_a^E$  и  $\pi_p^E$ , а из них – определяющие критерии подобия для данного РУ. Их состав определяется допустимой погрешностью вычислений и точности реализации оптимальных коэффициентов трансформации. Еще один настроечный параметр – зона нечувствительности  $i$ -го коэффициента трансформации  $\delta k_i$  задается после анализа чувствительности критерия оптимальности  $F$  к изменению коэффициентов трансформации по методике, изложенной в [4].

В такой схеме эталонная модель является частью системы управления. На разных этапах внедрения САУ эталонная модель может выполнять различные функции. На начальном этапе автоматизации, когда необходимо согласовывать оперативное управление диспетчером с автоматическим, она используется в качестве имитационной модели, с помощью которой оперативный персонал не только анализирует, определяет и корректирует настроечные параметры САУ, но и имеет возможность "проигрывать" состояния ЭЭС и оценивать последствия управляющих воздействий, в том числе автоматических. На завершающем этапе, когда оптимальное управление нормальными режимами ЭЭС осуществляется преимущественно локальными САУ, эталонная модель становится основным элементом самонастройки и самоанализа САУ.

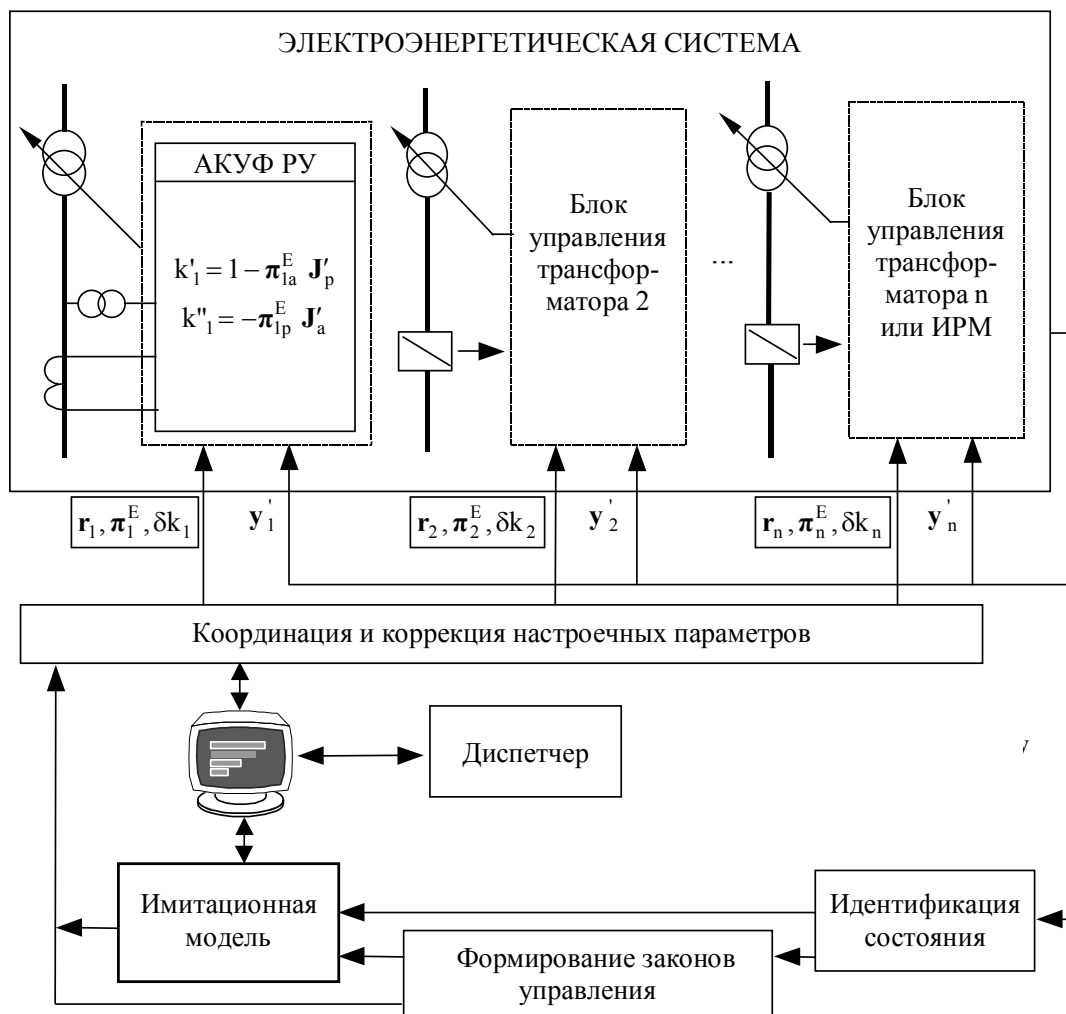


Рис.1. Структурная схема оптимального управления

На рис. 2 в качестве примера приведены критериальные зависимости критерия оптимальности от коэффициентов трансформации  $F_* = f(\mathbf{k}_*)$ . На основании таких зависимостей

устанавливаются зоны нечувствительности коэффициентов трансформации  $\delta k_i$ . Очевидно, что численные значения  $\delta k_i$  зависят от величины зоны нечувствительности критерия оптимальности  $\delta F_*$  и характера зависимости  $F_* = f(k_*)$ .

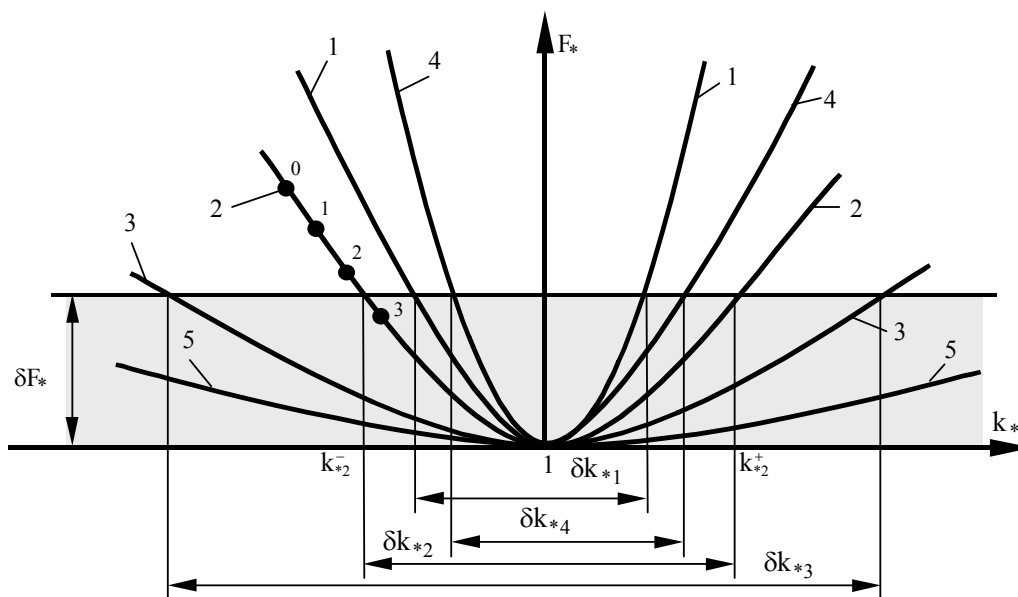


Рис. 2. Критериальные зависимости трансформаторов

Координация работы трансформаторов при оптимальном управлении осуществляется по критериальным зависимостям  $F_* = f(k_*)$ . Они отображают технические возможности трансформаторов в управлении потерями мощности в ЭЭС и используются для определения влияния их на потоки мощности. Для того, чтобы разделить трансформаторы на функциональные группы и определить роль каждого из них в САУ потоками мощности, решается обратная задача чувствительности [3, 5]. В результате ее решения при заданной зоне нечувствительности критерия оптимальности  $\delta F_*$  определяются зоны нечувствительности  $\delta k_i$  коэффициентов трансформации. Как видно из рис. 2, размеры этих зон отвечают реальным возможностям трансформаторов влиять на потери. В соответствии с их регулирующим эффектом устанавливается различная интенсивность переключений для трансформаторов ЭЭС. При такой организации работы системы управления введение режима ЭЭС в область оптимальности реализуется с использованием минимально возможного количества управляющих воздействий, что в свою очередь обеспечивает надежность и рациональное использование ресурса регулирующих устройств. Например, (см. рис. 2) вторым трансформатором для ввода  $F$  в область оптимальности следует выполнить три переключения.

Устройства АКУФ РУ, которые реализуют законы управления (5)-(6), строятся по типовой схеме построения микропроцессорных систем. Структурная схема устройств представлена на рис. 3. Кроме типовых блоков, они содержат энергонезависимое оперативное запоминающее устройство (ОЗУ), предназначенное для хранения копий значений основных параметров устройства при временном исчезновении питания; блок управления РУ с окончными реле "Увеличить" и "Уменьшить" для переключения устройства РПН в соответствующих направлениях; блок связи с центральной системой управления, предназначенный для передачи законов управления, параметров режима ЭЭС и номеров отпайки. Устройства могут работать в двух основных режимах: 1) управление в соответствии с законом (при наличии в достаточном количестве достоверной информации о состоянии электрической сети); 2) получение от центральной системы управления номера отпайки и установка ее на регуляторе РПН (при отсутствии в достаточном количестве значений параметров электрической сети, или при дистанционном управлении диспетчером энергосистемы).

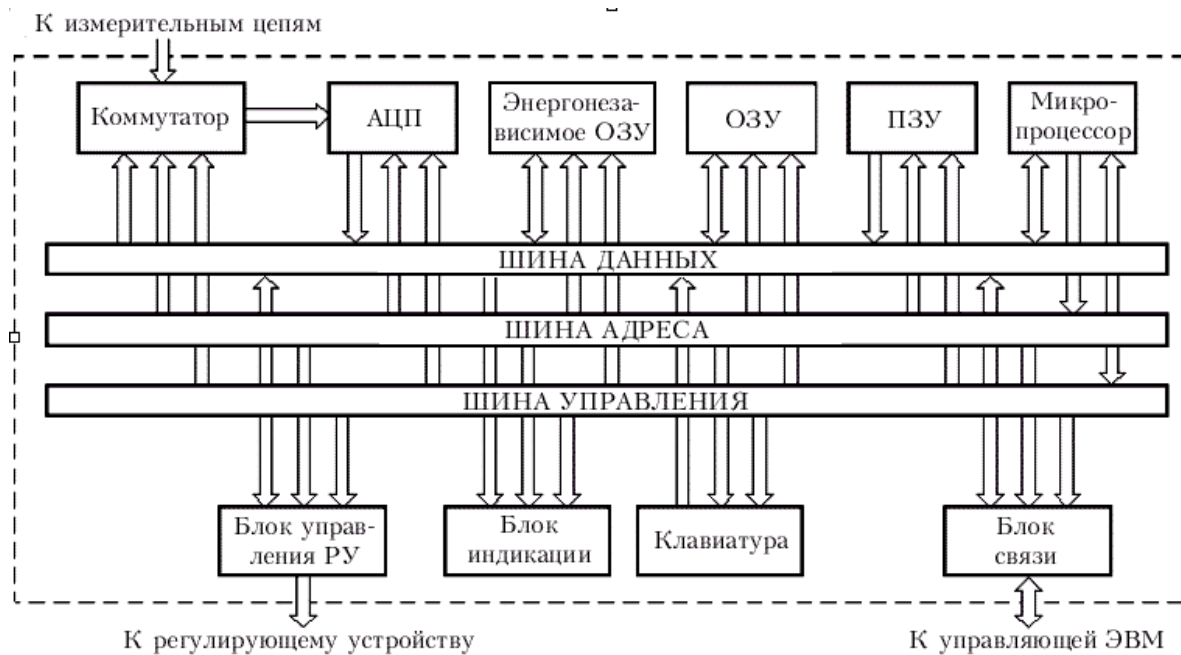


Рис. 3. Структурная схема устройства АКУФ РУ

Таким образом, при автоматизации оптимального управления потоками мощности и напряжением в ЭЭС возможно и целесообразно применять методы теории подобия и моделирования. Они дают возможность решать задачи, характерные для АСДУ, исходя из единых методологических позиций на всех этапах оптимального управления. Такой подход позволяет реализовать адаптивную САУ с децентрализацией части функций АСДУ практически без нарушения принципов централизованного управления.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Лежнюк П.Д., Пауткина Л.Р. Подобие и расчет оптимального токораспределения в электрической сети // Изв. вузов. Энергетика. - 1989. - №2. - С. 51-53.
2. Лежнюк П.Д., Оболонський Д.І., Пауткіна Л.Р. Моделювання впливу неоднорідності електричної системи на оптимальність її режиму // Вісник ВПІ. - 1996. - № 4. - С. 44-49.
3. Воротницкий В.Э., Лежнюк П.Д., Серова И.А. Методика и программа оценки эффективности применения РПН и АРПН в замкнутых электрических сетях // Электрические станции. - 1992. - №1. - С. 60-66.
4. Астахов Ю.Н., Лежнюк П.Д. Применение теории подобия в задачах управления нормальными режимами электроэнергетических систем // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. - 1990. - №5. - С.3-11.
5. Розенвассер Е.Н., Юсупов Р.М. Чувствительность систем управления. – М.: Наука, 1981. – 464 с.

**Адрес для контактов:** 21021, г. Винница, Хмельницкое шоссе, 95. Винницкий государственный технический университет, кафедра электрических станций и систем.

**Тел.** (0432) 44-03-77; 44-72-22. **e-mail:** [ess@energo.vstu.vinnica.ua](mailto:ess@energo.vstu.vinnica.ua) <http://www.vstu.vinnica.ua>